



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANNI MÄKELÄ
LASTILUUKUN SUUNNITTELUPROSESSIN
KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Reijo Kouhia
yliopistonlehtori Sami Pajunen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 04.12.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

ANNI MÄKELÄ: Lastiluukun suunnitteluprosessin kehittäminen

Diplomityö, 51 sivua, 2 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi

Tarkastajat: Professori Reijo Kouhia, yliopistonlehtori Sami Pajunen

Avainsanat: optimointi, lujuuslaskenta, konttilaivan lastiluukku, suunnitteluprosessi, lommahdusanalyysi

Tämä diplomityö on esitutkimus, jonka tavoitteena on selvittää millaisia mahdollisuuksia on konttilaivan lastiluukun optimoinnin automatisoinnissa. Automatisoinnilla pyritään nopeuttamaan esimerkiksi tarjouslaskenta- ja suunnitteluvaiheessa käytettävää laskenta-aikaa. Työn yhteydessä tutkitaan jo aiemmin kehitetyn optimointimenetelmän toimivuutta konttilaivan lastiluukun tapauksessa sekä pyritään selvittämään mahdollisia uusia menetelmiä tälle luokkutyypille.

Työn alussa käydään läpi yleisesti lastiluukun suunnitteluprosessia ja sen sisältämiä haasteita. Laskenta ja esimerkit on jaettu kahteen toisiinsa liittyvään osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään lastiluukun rakenteen optimointia ja mitoitusta kannen paksuuden optimointia esittelevän esimerkin avulla. Toisessa osassa selvitetään erilaisten lommahdusanalyysien toimivuutta lastiluukun lommahduslaskennassa. Tutkittuja menetelmiä on havainnollistettu lommahdusmenetelmiä käsittelevien esimerkkien avulla.

Rakenteen optimointi antaa hyviä tuloksia ja sen käyttöä kannattaa harkita myös käytännön laskennassa. Lommahdusta koskevissa tutkimuksissa ei löydetty vielä uutta parempaa menetelmää. ANSYS:en käyttämän lineaarisen ominaisarvomenetelmän ja luokituksen mukaisen menetelmän vertailussa löydettiin yhtäläisyyksiä, mutta tulosten soveltaminen vaatii vielä runsaasti lisätutkimusta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

ANNI MÄKELÄ: Developing the hatch cover design process

Master of Science Thesis, 51 pages, 2 Appendix pages

December 2013

Major: Analysis of machines and structures

Examiners: Professor Reijo Kouhia, University Lecturer Sami Pajunen

Keywords: Optimization, Strength Analysis, lift away hatch cover, buckling, design process

This thesis is a preliminary study with the aim of finding out and investigating different methods for automating the optimization process of lift away-type hatch covers. Automation of this process could be used to speed up calculations for example during tendering phase and design phases. This thesis examines how the previously developed optimization method works with the cargo ship hatch cover and seeks to determine the potential of new methods for this hatch type.

At the beginning of the thesis there is a short introduction about the design process of the hatch cover and a brief introduction about used optimization algorithms. The rest of the thesis is divided into two parts. The topic of the first part is an optimization of the structure and it includes one design example. The second part is about buckling analysis which is illustrated with examples.

Based on the results presented in this thesis optimization of the structure seems to be suitable for being used in a real design process. However, the buckling analysis did not produce a better method as of yet. Similarities were found between the linear eigenvalue buckling analysis by ANSYS and the categorical method, but considerable further research is needed in this area.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston teknisen suunnittelun laitoksella koneiden ja rakenteiden analysoinnin pääaineeseen. Työ on tehty yhteistyössä MacGregorin kanssa.

Aluksi haluan kiittää työn ohjaajanani toiminutta yliopistonlehtori Sami Pajusta työni aikana saamastani ohjauksesta ja neuvoista. Työn tarkastajana toiminutta professori Reijo Kouhiala haluan kiittää saamastani palautteesta sekä mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö. Lisäksi kiitän MacGregorin puolelta yhteyshenkilönä toiminutta diplomi-insinööri Jouni Lehtistä kaikesta työn edetessä saamastani avusta.

Erityisesti haluan kiittää mahtavia työkavereitani Ossia ja Anttia saamastani kannustuksesta ja tuesta. Suuret kiitokset haluan osoittaa myös Laurille, joka kärsivällisesti jaksoi kannustaa minua työssäni eteenpäin niin hyvinä, kuin huonoinakin hetkinä. Lopuksi haluan kiittää kaikkia muita työssäni minua tukeneita henkilöitä.

Tampereella 20. joulukuuta 2013

Anni Mäkelä

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
1.1 Työn rajausta ja tavoite	2
2. Lastiluukun suunnittelu	5
2.1 Lastiluukkujen suunnitteluprosessi	5
2.1.1 Tarjousvaihe	5
2.1.2 Suunnitteluvaihe	5
2.2 Lastiluukku	6
2.3 Kuormitustapaukset	7
3. Optimointimenetelmiä	9
3.1 Sisäpistemenetelmä	9
3.2 Simplex	10
3.3 Binaariooptimointi	11
4. Lastiluukun rakenteen optimointi	13
4.1 CAD-malli	13
4.2 ANSYS Workbench	15
4.2.1 Elementtityyppi	16
4.2.2 Reunaehdot	16
4.3 Simpro	16
4.3.1 Metamalli	17
4.4 Mitoituksen periaatteita	20
4.5 Esimerkki lastiluukun rakenteen optimoinnista	22
4.6 Muodon optimointi	27
5. Lomahdustarkastelut	29
5.1 Luokituksen mukainen lomahdustarkastelu	30
5.2 Luokituksen mukaisen ja lineaarisen lomahdustarkastelun vertailua	33
5.3 Lomahdustikkujen automaattinen optimointi	36
5.4 Lomahdustikkujen lisääminen ilman optimointia	37
6. Lomahduslaskentamenetelmien soveltaminen lastiluukun suunnittelussa	39
6.1 Luokituksen mukainen menetelmä	40
6.2 Lomahdustikkujen automaattinen optimointi	42
6.3 Lomahdustikkujen lisäysmenetelmä	45
6.4 Menetelmien tulosten vertailu	47
7. Yhteenveto	48
Lähteet	51
A. Liitteitä	52

MERKINNÄT

$\min f$	minimoidaan kohdefunktiota f
\mathbf{X}^{-1}	matriisin \mathbf{X} käänteismatriisi
α	kohdealueen säde, levykentän sivusuhte
β	regressiokerroin
ϵ	virhetermi
$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_\tau$	vertailujoikkuusluvusta riippuvat kertoimet
λ	vertailujoikkuusluku
λ_p	kuormituskerroin
σ_{max}	suurin puristusjännitys
σ_{min}	pienin puristusjännitys
σ_e	vertailujännitys
σ_F	materiaalin myötöraja
σ_v	vonMises-jännitys
σ_x	x-suuntainen normaalijännitys
σ_y	y-suuntainen normaalijännitys
τ	leikkausjännitys
Ψ	jännityssuhde
$\mathbf{0}$	nollavektori
\mathbf{A}_{eq}	lineaariset yhtäsuuruusehdot, matriisi
B	jännitysten suunnasta riippuva kerroin
\mathbf{b}_{eq}	lineaariset yhtäsuuruusehdot, vektori
\bar{e}	hyväksytty virhe
e_1, e_2, e_3	κ -kertoimista riippuvat eksponentit
f	vastefunktion approksimaatio

F_1	levykentän tuennasta riippuva kerroin
g	estimaattivektori
K	lommahduskerroin
m	rakenteen massa
N	koepisteiden lukumäärä
\mathbb{R}	reaalilukujen joukko
\mathbb{R}^n	n -ulotteinen reaaliavaruus
S	varmuusluku lommahduksen suhteen
t	levyn paksuus
\mathbf{X}	datamatriisi
x	faktori
\mathbf{X}^T	matriisin \mathbf{X} transpoosi
\mathbf{x}_l	alrajavektori
\mathbf{x}_u	ylärajavektori
y	vaste
\hat{y}	vasteen ennuste

1. JOHDANTO

Yleisin laivaliikenteessä käytetty lastin kuljetusyksikkö on kontti. Kontti on tavaroiden kuljettamiseen tarkoitettu laatikko, jonka koko ja kulmien kiinnikkeet on standardisoitu. Kontteihin voidaan lastata lähes mitä tavaraa tahansa, joten se on helppo tapa muokata erilaisista lähetyksistä helposti kuljetettavia yksiköitä. Tavallisimmat konttien pituudet ovat 20 ja 40 jalkaa eli noin 6 m ja 12 m.

Konttien yleistyminen merikuljetuksissa 1950-luvulta lähtien synnytti konttien kuljetusta varten uudenlaisen laivatyyppin konttialuksen, josta nykypäivän esimerkki kuvassa 1.1. Suljetut kontit mahdollistivat tavarankuljetuksen "ovelta ovelle" ilman välipurkua ja -lastausta kuljetuksen eri vaiheissa. Satamista kontit kuljetetaan kuorma-autoilla ja junilla määränpäihinsä. Ensimmäisen konttilaivan kapasiteetti oli 436 konttia. Vuosituhannen vaihteessa on konttialuksissa tapahtunut nopeaa kehitystä. Tällä hetkellä suurimmat konttialukset voivat kuljettaa yli 15 000 20 jalkaista konttia. [1; 2]

Veljekset Robert and Joseph MacGregor kehittivät ja patentoivat ensimmäisen teräksisen lastiluukun vuonna 1929. Nykyään alusten lastiluukut ovat konttilaivan suurin yksittäinen varusteosa. Yksi lastiluukku voi painaa kymmeniä tonneja. Lastiluukkuja on kolmea erilaista tyyppiä: kansilevyllisiä eli niin kutsuttuja yksinahkaisia, kansi- ja pohjalevyllisiä eli kaksinahkaisia ja ponttoonimallisia. Tässä työssä esitetty lastiluukku on tyypiltään kokonaan pois nostettava (Lift away type Weather Deck Hatch Cover) yksinahkainen luukku, joka näkyy ylös nostettuna kuvassa 1.2.

Konttilaivassa lastiluukku lisää laivan kuljetuskapasiteettia, sillä ruuman lisäksi kontteja voidaan pinota luukun päälle, kuten esimerkki kuvassa 1.2 on tehty. Konttipinot luukun päällä tuovat vaatimuksia lastiluukkujen mitoitukselle, sillä konttipinot saattavat kohota yli kymmenenkin kontin korkuiseksi. Yleensä lastiluukut suunnitellaan niin, että niiden päälle voidaan pinota sekä 20 että 40 jalkaa pitkiä standardikonttejakontteja. Kansilastin korkeutta rajoittaa tällä hetkellä kontinrungon ja kiinnityselinten lujuus. Konttipinon kokonaispainot vaihtelevat konttien koon mukaan. Yleensä pinon ylimmät kontit ovat tyhjiä, jotta pinon alimmat kontit jaksavat kantaa päällimmäisten konttien aiheuttaman kuormituksen. [1; 3]

Luokituslaitoksen säännöt määrittävät konttialuksen lastiluukun lujuusvaatimukset. Lastiluukun on oltava riittävän jäykkä, jotta sen päälle koottavat konttipinot pysyvät suorina. Luukun tulee lastin lisäksi kestää merenkäynnistä aiheutuvat lai-



Kuva 1.1: Konttilaiva. Lähde: MacGregor

van rungon liikkeit sekä niin kutsuttu sääkuorma. Optimaalinen lastiluukun lujuus ottaa huomioon nämä molemmat vaatimukset. Säännöt antavat suunnittelijoille ohjeistuksen siitä, miten luukun rakenne tulee suunnitella kuormituksen ja mitoituksen osalta. Luokituslaitokset eivät kuitenkaan anna tarkkoja ohjeita, miten kannen yksityiskohdat tulee suunnitella, joten yksityiskohdat suunnitellaan laivakohtaisesti asiakkaan toiveiden ja telakoiden omien standardien mukaisesti. [1; 2]

1.1 Työn rajaus ja tavoite

Työ tehdään yhteistyössä MacGregorin kanssa. Työhön liittyvät tavoitteet tulevat heidän tarpeistaan, joten tutkimuskohteeksi valikoitui konttialuksen lastiluukku. Esitutkimus lastiluukun rakenteen optimoinnin kehittämiseksi liittyy lastiluukkujen tarjouslaskentaan ja suunnitteluun liittyvien toimintatapojen kehittämiseen. Tavoitteena on tunnistaa olennaisimmat haasteet konttilaivojen lastiluukkujen optimoinnissa, erilaisten ratkaisumallien tutkiminen ja niiden arviointi. Tämän hetkiseen toimintamalliin paneudutaan lisää lastiluukun suunnittelua käsittelevässä kappaleessa. Kappaleessa käydään pääpiirteittäin läpi lastiluukun suunnittelun eri vaiheet.

Lastiluukun optimoinnissa on työn puitteissa käytetty Simplex- ja sisäpistemenetelmän algoritmeja sekä binääristä optimointia. Algoritmit ja niiden käyttö tämän tutkimuksen osalta esitellään optimoinnin teoriaa käsittelevässä kappaleessa. Tut-



Kuva 1.2: Pois nostettava lastiluukku. Kuvassa näkyy myös konttien sijoittelu sekä ruumaan että lastiluukun päälle. Lähde: MacGregor

kimuksessa ei kuitenkaan käsittellä optimoinnin teoriaa syvemältä, kuin aiheen ymmärtämisen kannalta on välttämätöntä.

Työn yhtenä tavoitteena on ollut laskennan automatisoiminen. Automatisoinnilla tässä yhteydessä tarkoitetaan optimointiin liittyvän kokemuspohjaisen päätöksenteon siirtämistä tietokoneelle. Automatisoinnin tavoitteena on karkea mallinnus- ja optimointimenetelmä, jotta käyttäjä voi suorittaa optimoinnin mahdollisimman nopeasti. Käyttäjälle automatisointi tarjoaa mahdollisuuden laskea useita tapauksia samanaikaisesti, jolloin työnteko tehostuu. [4]

Lommahdus- ja jännitystarkastelun osalta tavoitteena on löytää uusia vaihtoehtoja aikaisemmassa tutkimustyössä löydetyille ratkaisuille. Tarkoituksena on saada kokonaiskuva mahdollisen uuden menetelmän hyödynnettävyydestä ja verrata sitä nykyisin käytettyyn malliin. Lopussa pohditaan voidaanko konttilaivojen lastiluukuja optimoida automaattisesti siten, että tulokset ovat käyviä esimerkiksi tarjous-suunnittelun tarpeisiin. Työn tavoitteena ei ole saada aikaan valmista menetelmää tai työkalua, vaan tehdä esitutkimusta mahdollisia tulevia uusia menetelmiä varten.

Haasteena tässä työssä on luokkutyyppin kolme erilaista kuormitustyyppiä, joista muodostuu eri konttikoot huomioiden yhteensä viisi eri kuormitustapausta. Erilaiset kuormitustyyppit on esitelty lastiluukun suunnittelua koskevassa kappaleessa. Koska tavoitteena ei ole saada aikaan valmista työkalua, työssä esitellyissä esimerkeissä ei ole käytetty kaikkia viittä erilaista kuormitustapausta. Useissa esimerkeissä on käytetty yhtä tai kahta erilaista kuormitustilannetta ja pohdittu niiden perusteella menetelmän sovellettavuutta useammille tapauksille. Suunnittelussa kaikki luokituksen vaatimat kuormitustyyppit on kuitenkin analysoitava.

Koska työssä on pyritty tutkimaan enemmän menetelmiä, kuin varsinaisesti lastiluukkuja, on joidenkin tapausten osalta päädytty tutkimaan vain luukun tiettyä osaa. Lommahdusta koskevissa esimerkeissä on tutkittu ainoastaan luukun kantta. Kansi on esimerkkinä selkeä ja sen avulla on helppo havainnollistaa eri menetelmien toimivuutta. Lommahdustarkastelujen ulkopuolelle on rajattu lastiluukun uumat. Uumien lommahduksia analysoitaessa voitaneen hyödyntää kannen laskennassa esiteltyjä menetelmiä.

Työkaluina tämän työn tekemiseen on käytetty ANSYS elementtimenetelmäohjelmistoa ja sen Workbench-ohjelmistoa sekä optimointityökalu Simpro:a. Simpro on TTY:llä tutkimushankkeessa kehitelty rajapintatyökalu laskijan ja optimointiohjelmien välillä. Työssä esiteltyjä menetelmiä voidaan hyödyntää myös muilla sopivilla ohjelmilla. ANSYS Workbench esiintyy tästä eteenpäin lyhyemmin pelkällä nimityksellä ANSYS, ellei asiasta toisin mainita. Elementtimenetelmästä käytetään lyhyempää yleisesti käytössä olevaa ilmaisua FEM (Finite Element Method).

2. LASTILUUKUN SUUNNITTELU

2.1 Lastiluukkujen suunnitteluprosessi

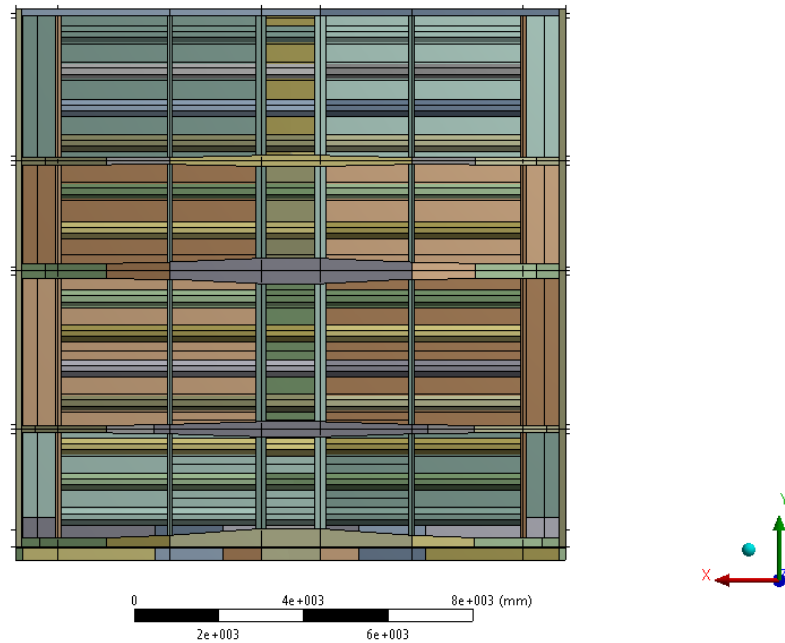
Uuden lastiluukun suunnittelu lähtee asiakkaan tarpeesta ja luukkuun liittyvistä toiveista. Asiakkaan antamien tietojen pohjalta suunnitellaan kannen perusrakenne. Lastiluukkujen suunnittelun ensimmäinen vaihe on konseptointi. Vaiheen pääpaino on toimivuudessa ja se sisältää samoja vaiheita kuin tarjousvaihe, mutta tarkkuus vaihtelee lähtötietojen ja asiakkaan mukaan.

2.1.1 Tarjousvaihe

Tarjousvaiheessa muodostetaan rakenteen layout ja määritetään luukun operoitavuus, teräspaino ja pääkomponentit. Tavoitteena on määrittää asiakkaalle luukun toimivuus ja hinta. Aluksi määritellään laivan paneelijako, joka riippuu esimerkiksi laivan leveydestä ja operointivaatimuksista. Paneelijaolla tarkoitetaan lastiluukkujen sijoittelua laivan runkoon. Kun luukkujen määrä ja sijoittelu on selvitetty määritetään konttien sijoittelu. Laivan poikittaissuunnassa määritetään konttien välit ja pituussuunnassa eripituisten konttien asettelu. Tämän jälkeen voidaan määrittää jokaiselle paneelille halutut konttipinot, mikä tehdään eripituisille konteille ja niiden yhdistelmille erikseen. Konttipinoista lasketaan muun muassa pinojen painopisteet. Tarjousvaiheeseen kuuluu myös selvittää paneelien rakennekorkeus, joka määritetään kokemuksella tai referenssiprojektien pohjalta. Lopuksi suunnittelussa huomioidaan asiakkaan erityistoiveet, joita voi olla esimerkiksi jotkin teräsrakenteen yksityiskohdat ja komponentit.

2.1.2 Suunnitteluvaihe

Kun tarjous on hyväksytty päästään suunnitteluvaiheeseen, jonka aikana suunnitellaan valmistusta varten luukun lopulliset järjestelmät ja rakenteet. Luukun lopullista lujuuslaskentaa varten määritetään aluksi konttipinon massa ja painopiste. Luokitustiloksen säännösten perusteella määritetään dynaamiset kertoimet eli niin sanotut kulmavoimat. Kulmavoimat lasketaan eri kuormitustapauksilla konttipinon jokaisesta kulmasta, jotta tiedetään millä voimalla pino vaikuttaa tukirakenteeseen.



Kuva 2.1: Kokonainen lastiluukun kansi suoraan alapuolelta kuvattuna

Kulmavoimien laskentaa varten pitää tietää sovellettava luokka tai säännöstö, huomioon otettavat kuormitustapaukset sekä luukun sijainti laivan pituusakselilla. Luukun sijainti laivan pituuteen nähden vaikuttaa dynaamiseen kertoimeen. Kerroin on suurimmillan laivan keulassa ja perässä.

Tämän jälkeen määritetään rakenne, joka on käypä kaikissa kuormitustapauksissa. Laskenta sisältää useita perättäisiä FEM-analyyssejä, joiden perusteella määritetään rakenteen paksuudet ja jäykisteprofilien paikat ja lukumäärä. Vaatimuksena on, että luukku ei ylitä sallittuja jännityksiä ja että lommahdus on estetty luokan säännösten mukaisesti. Tavoitteena on mahdollisimman kevyt ja kestävä rakenne valmistettavuus huomioon ottaen.

Saaduista tuloksista laaditaan kuvat ja raportti. Raportin perusteella luokituslaitos voi tarkistaa rakenteen toimivuuden. Kun rakenne on hyväksytty päästään määrittelemään rakenteen yksityiskohdat ja tuottamaan tarvittava dokumentaatio. Lopullisen luukun suunnittelussa tarkastetaan vielä yksittäisten komponenttien tuennat ja kestävyys ja sen perusteella tehdään komponenttien lopullinen valinta sekä suunnitellaan rakenteen yksityiskohdat, kuten paikalliset tuennat.

2.2 Lastiluukku

Tässä työssä esitelty lastiluukkuesimerkki kuvassa 2.1 on tyypillinen lastiluukku laivan laitalohkelta. Laitalohkolla sijaitseva lastiluukku sijaitsee kansirivistön reunimmaisena, joten se on tuettu kolmelta reunaltaan. Keskilohkolla eli kansirivistön



Kuva 2.2: Konttilaiva, jonka keskilohkoilta puuttuu vielä kolme lastiluukkua. Lähde: MacGregor

keskimmäisinä sijaitsevat kannet on tuettu kahdelta sivulta. Kuvassa 2.2 näkyy kolme avoinna olevaa lastiluukun paikkaa laivan keskilohkolta eli lastiluukkurivistön keskeltä.

Lastiluukun ainevahvuuden määrittämistä varten luukun eri osissa on luokituslaitos asettanut tietyt lujuusvaatimukset. Konttilaivan lastiluukulle sovellettavat vaatimukset ja määritelmät soveltuvat kaikille laivatyypeille pois lukien bulkki-, malmi- ja yhdistelmäalukset. Materiaalivaatimuksena on teräksestä valmistettu luukku. Muissa tapauksissa luokitus tehdään tapauskohtaisesti. [3]

2.3 Kuormitustapaukset

Lastiluukun lujuuslaskentaa varten lasketaan erilaisia kuormitustapauksia, joiden laskennassa käytetään luokituksen antamia sääntöjä. Konttilaivassa lastiluukkua mitoittavia tapauksia on kolme: sääkuorma, kallistumisen aiheuttama kuormitus ja pystysuora kuormitus.

Sääkuormalla tarkoitetaan laivan kannen yli pyyhkäisevän veden aiheuttamaa kuormaa. Kuormaa kuvataan 3,5m korkealla vesipatsaalla. Kuorma mallinnetaan lujuuslaskentamallissa lastiluukun kannen pintaan painekuormana. Sääkuorma mi-

toittaa kannen jäykisteet. Sääkuorman suuruuteen vaikuttaa aluksen mitat, kuten pituus ja leveys sekä luukun aukon koko. Luokitus antaa tarkemman ohjeistuksen sääkuorman laskemiseen. [3]

Konttilaivassa lastiluukun ruuman lisäksi myös luukun päälle asetetaan kontteja. Konttien lukumäärä määrittää miten suuret kuormitukset luukkuun kohdistuu. Ensimmäinen kontteihin liittyvä kuormitustapaus tulee kyseeseen, kun laiva on paikoillaan satamassa. Tällöin oletetaan ettei laiva pääse kallistumaan jolloin konttipinojen lastiluukkuun kohdistama kuorma on pistemäinen pystysuuntainen puristus. Pystysuorasta kuormituksesta lasketaan kaksi erillistä tapausta 20 ja 40 jalkaisille konttipinoille. [3]

Laivan ollessa merellä aallot kallistavat laivaa puolelta toiselle. Kallistumisesta seuraa pistemäisiä veto- ja puristuskuormituksia konttipinojen kiinnityskohtiin. Laivan kallistuminen aiheuttaa konttipinon painopisteen siirtymisen jopa yli laivan reunan. Laskennassa kallistumiskulmana käytetään 30 asteen kallistuskulmaa laivankannen alkuasemasta. Luokitus antaa tarvittavat dynaamiset kertoimet kuormituksen laskemiselle. Lisäksi laskennassa käytetään luokituksen kulmavoimataulukkoa.

Useiden kuormitustapausten laskeminen lisää luukun rakenteen optimoinnissa laskenta-aikaa verrattuna yhden kuormitustapausten laskentaan. Tapaukset saadaan kuitenkin optimoitua rinnan, niin että optimitulos on käypä kaikilla eri kuormitustapauksilla. Jokainen uusi kuormitustapaus lisää optimoitavien parametrien määrää. Suunnittelumuuttujien määrä kerrotaan kuormitustapausten määrällä, jolloin jo muutamalla kuormitustapauksella laskettavien parametrien määrä moninkertaistuu. Kuitenkin laskentaa varten eri kuormitustapausten samaa optimoitavaa parametria vastaavat parametrit voidaan merkitä yhtä suuriksi, jolloin päästään takaisin alkuperäiseen määrään optimoitavia suunnittelumuuttujia.

3. OPTIMOINTIMENETELMIÄ

Tässä työssä on päädytty käyttämään lineaarista metamallia, jolloin optimointitehtävä saadaan lineaariseksi. Konttilaivan lastiluukun tapauksessa minimoitavia asioita ovat luukun massa ja lommahdusanalyysissä sekundäärisiten jäykisteiden eli lommahdusjäykisteiden määrä. Aiempien tutkimusten vastaavissa tilanteissa on lineaarinen optimointi todettu käyttökelpoiseksi. Käytettäviksi optimointimenetelmiksi valikoituivat Simplex, sisäpistemenetelmä, binäärinen optimointi sekä diskreettien joukkojen optimointi. Näistä jo kahta ensimmäistä soveltamalla voidaan laskea tässä työssä esitetyt esimerkit.

Tässä luvussa esitellään pääpiirteittäin kolme MATLAB-ohjelmiston lineaarisen optimoinnin ratkaisualgoritmia. Myös muilla laskentaohjelmilla on käytössä vastaavia optimointialgoritmeja. Lisää tietoa optimointialgoritmeista löytyy alan kirjallisuudesta. [5]

3.1 Sisäpistemenetelmä

Sisäpistemenetelmällä voidaan ratkaista suuria sekä lineaarisia että epälineaarisia optimointiongelmia. Toisin kuin Simplex-menetelmässä, optimaalinen ratkaisu löytyy käyvän alueen sisäpuolelta tai sen reunoilta. Lähestymällä optimiratkaisua alueen sisäpuolelta päästään tulokseen suoremmin ja näin vältetään turhaa laskemista. Menetelmä ei vaadi suurta muistikapasiteettia ja on erityisen edullinen laskettaessa suuria optimointitehtäviä.

Optimointia varten tehtävä asetetaan standardimuotoon

$$\min_x \mathbf{f}^T \mathbf{x} \text{ siten että } = \begin{cases} \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \\ \mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \end{cases} \quad (3.1)$$

jossa \mathbf{x} kuuluu avaruuteen \mathbb{R}^n , vektori \mathbf{b} kuuluu avaruuteen \mathbb{R}^m ja matriisi \mathbf{A} on kooltaan $m \times n$ -matriisi, $m \leq n$. Jos yhtälöön lisätään apumuuttuja \mathbf{s} (slack variable) yhtälö 3.1 asettuu muotoon

$$\min_x \mathbf{f}^T \mathbf{x} \text{ siten että } = \begin{cases} \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \\ \mathbf{x} + \mathbf{s} = \mathbf{x}_u \\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{s} \geq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (3.2)$$

jossa $\mathbf{x} + \mathbf{s} = \mathbf{u}$ on yhtälörajoite. Yhtälö 3.2 on optimointiongelman primäärimuoto. Duaalimuodossa yhtälö on muuntautunut muotoon

$$\max_x \mathbf{b}^T \mathbf{y} - \mathbf{u}^T \mathbf{w} \text{ siten että } = \begin{cases} \mathbf{A}^T \mathbf{y} - \mathbf{w} + \mathbf{z} = \mathbf{f} \\ \mathbf{z} \geq \mathbf{0}, \mathbf{w} \geq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (3.3)$$

jossa \mathbf{y} ja \mathbf{w} sisältävät duaalimuuttujat ja \mathbf{z} sisältää duaali apumuuttujat. Yhtälö 3.4 sisältää sekä primaali- että duaalitehtävän ehdot

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{s}, \mathbf{w}) = \begin{pmatrix} \mathbf{Ax} - \mathbf{b} \\ \mathbf{x} + \mathbf{s} - \mathbf{x}_u \\ \mathbf{A}^T \mathbf{y} - \mathbf{w} + \mathbf{z} - \mathbf{f} \\ \mathbf{x}_i \mathbf{z}_i \\ \mathbf{s}_i \mathbf{w}_i \end{pmatrix} = \mathbf{0}, \text{ siten että } \mathbf{x} \leq \mathbf{0}, \mathbf{z} \leq \mathbf{0}, \mathbf{s} \leq \mathbf{0}, \mathbf{w} \leq \mathbf{0}, \quad (3.4)$$

jossa $\mathbf{x}_i \mathbf{z}_i$ ja $\mathbf{s}_i \mathbf{w}_i$ tarkoittavat kertolaskua alkioittain. Kvadraattiset yhtälöt $\mathbf{x}_i \mathbf{z}_i = 0$ ja $\mathbf{s}_i \mathbf{w}_i = 0$ ovat täydentäviä ehtoja lineaarista optimointia varten. Muut yhtälöt ovat käypyysehtoja.

MATLAB:n käyttämä algoritmi on primaali-duaali algoritmi, mikä tarkoittaa sitä, että molemmat optimointitehtävät ratkaistaan yhtäaikaaisesti. Iteroitavat \mathbf{x} , \mathbf{y} ja \mathbf{w} pysyvät koko optimoinnin ajan rajoitusetojen mukaisella käyvällä alueella. Iterointia jatketaan, kunnes löydetään tehtävän optimipiste. [6; 5; 7]

3.2 Simplex

Simplex on yli 60 vuotta vanha ja edelleen yleisesti käytössä oleva optimointialgoritmi. Pienissä ja keskisuurissa tehtävissä Simplex-algoritmi on hyvä ja luotettava. Menetelmässä tehtävä ratkaistaan kulkemalla käyvän alueen reunapisteissä kohti tehtävän optimaalista ratkaisua. Suurissa tehtävissä kulmapisteitä muodostuu niin paljon, että laskenta saattaa muodostua tehokkaallakin koneella liian hitaaksi ja vaikeaksi. [7]

Algoritmi ratkaisee lineaarisen optimointiongelman

$$\min_x \mathbf{f}^T \mathbf{x} \text{ siten että } = \begin{cases} \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_{eq} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}, \\ \mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u. \end{cases} \quad (3.5)$$

jossa $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$ on matriisimuotoinen lineaarinen rajoite. Algoritmi liikkuu rajoitusehtojen muodostaman monikulmion reunoja pitkin pienenentäen kohdefunktiota \mathbf{f}^T askel askeleelta. Ensimmäisenä Simplex-menetelmässä haetaan käypä kulmapiste

$\mathbf{x}^k \in \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\}$ ratkaisemalla paloittain lineaarinen apuongelma. Apuongelman kohdefunktio on lineaarinen sakkofunktio

$$P = \sum_j P_j(x_j) \quad (3.6)$$

jossa $P_j(x_j)$ on määritelty

$$P_j(x_j) = \begin{cases} x_j - u_j & \text{jos } x_j > u_j \\ 0 & \text{jos } l_j \leq x_j \leq u_j \\ l_j - x_j & \text{jos } l_j > x_j \end{cases} \quad (3.7)$$

$P(x)$ mittaa kuinka paljon \mathbf{x} rikkoo rajoitusehtoja. Apuongelma on

$$\min_x \sum_j P_j \text{ siten että } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_{eq}\mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}. \end{cases} \quad (3.8)$$

Alkuperäisellä tehtävällä on käypä aloituspiste jos ja vain jos apuongelman arvo on vähintään 0.

Kun aloituspiste on löydetty apuongelman avulla, tarkistetaan nykyisen \mathbf{x}^k optimaalisuus. Jos optimipiste on löytynyt, voidaan iterointi lopettaa. Jos optimipistettä ei löydetty haetaan suunta, johon kohdefunktion arvoa voidaan pienentää ja kuljetaan löydettyyn suuntaan, kunnes tullaan käyvän alueen reunalle. Tämän jälkeen jälleen tutkitaan pisteen optimaalisuus ja sen perusteella päätetään jatketaanko iterointia. Jokaisella kierroksella algoritmi testaa optimaalisuusehdon ja pysähtyy, jos löydetty ratkaisu on optimi. Menetelmän löytämä ratkaisu on lineaaristen rajoitteiden muodostaman monikulmion nurkkapiste. [6; 5]

Simplex-menetelmää voidaan hyödyntää myös binäärisessä optimoinnissa. Simplex toimii binäärisen laskennan algoritmina, jos optimointiväli asetetaan nollan ja ykkösen välille ja optimointi suoritetaan kokonaisluvuilla. Tällöin optimoinnin tuloksena tulee suunnittelumuuttujalle aina nolla tai ykkönen. Parempia tuloksia saadaksen kuitenkin aikaan, jos käytetään oikeasti binääriselle optimoinnille tarkoitettua algoritmia.[7]

3.3 Binäärioptimointi

Binäärinen optimointitehtävä määritellään

$$\min_x \mathbf{f}^T \mathbf{x} \text{ siten että } = \begin{cases} \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_{eq} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}, \\ \mathbf{x} \text{ binäärinen} \end{cases} \quad (3.9)$$

jossa ratkaisu \mathbf{x} on binäärinen kokonaislukuvektori. Käytännössä ratkaisuvektori voi sisältää ainoastaan arvoja 0 ja 1. Binäärisessä optimointitehtävässä tavoitteena on minimoida lineaarinen funktio $\mathbf{f}^T \mathbf{x}$, jota rajoittaa rajoitusehdot.

MATLAB:n lineaarinen binäärioptimointialgoritmi perustuu rajaa ja haaraudu-menetelmään (Branch and bound). Menetelmä aloitetaan etsimällä käypä ratkaisupiste. Algoritmi muodostaa etsintää varten puun. Tässä vaiheessa algoritmi valitsee muuttujan x_j ja antaa sille arvot 0 ja 1 muodostaen näin haaran. Etsintäpuu muodostuu solmuista, jotka edustavat lisättyjä rajoitteita.

Löydetyt ratkaisut ovat kaikki käypiä, joten niitä voidaan käyttää etsintäpuun karsimiseen. Puun haaroja karsimalla pyritään löytämään globaali optimi. Solmun alarajan ylittäessä parhaimman tunnetun käyvän ratkaisun, ei kyseisestä hakupuusta voi löytyä globaalia ratkaisua, joten aliongelma voidaan poistaa hakupuusta. Etsintää jatketaan, kunnes kaikki solmut on käyty läpi, karsittu pois tai kun ratkaisun haluttu tarkkuus on saavutettu. [5]

4. LASTILUUKUN RAKENTEEN OPTIMOINTI

Lastiluukku on konttilaivan suurin yksittäinen varusteosa. Lastiluukun painon minimointi on tärkeää, sillä materiaalikustannukset ovat suurin tekijä lastiluukun hinnan muodostuksessa. Lastiluukun tehtävä on toimia ruuman sääsuojana sekä mahdollistaa konttien kuljetuksen myös luukun päällä. Konttialuksissa on usein yhtä lastausaukkoa kohden useampi lastiluukku. Rinnatusten sijoitetuilla lastiluukuilla saavutetaan paremmat lastin lastaus- ja purkuominaisuudet.

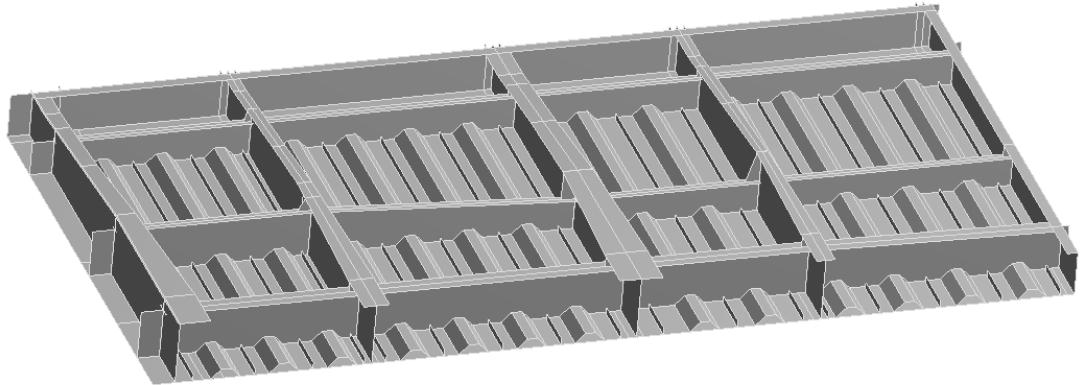
Lastiluukun mitoituksessa huomioitavia osia ovat kansilevy ja siihen kuuluvat jäykisteet sekä pituus- ja poikittaissuuntaiset kannatinpalkit. Kannatinpalkin vaakasuuntainen laippa on luukun pohjalla ja uuma on hitsattu laipan ja kannen väliin. Luukun reunoilla olevat kannatinpalkit ovat L-palkkeja, muuten palkit ovat T-palkkeja. Esimerkkinä käytetyssä lastiluukussa jäykisteet ovat profiililtaan trapetsipalkkeja. Lujuuslaskennan yhteydessä lastiluukusta mitoitetaan vain pääasialliset rakenneosat. Yksityiskohdat mitoitetaan erikseen.

Optimointia varten lastiluukun kannatinpalkkien paikat on määrätty sekä pitkittäis- että poikittaissuuntaan. Kansilevyn jako eri paksuisiin alueisiin on ennalta määrätty samoin kuin alueiden dimensiot. Lisäksi tehtävää varten on tuentojen paikat sekä jäykisteiden mitat ja jako ennalta päätetty. Määriteltäviä suunnittelumuttujia jäi lastiluukun rakenteelle 24 kappaletta.

4.1 CAD-malli

Aluksi lastiluukusta oli olemassa pelkkä CAD-malli. Alkuperäisessä SolidWorks-ohjelmalla toteutetussa mallissa on luukku kuvattuna yksityiskohtia myöden, joten sitä ei suoraan kannattanut käyttää lujuuslaskentamallina. Laskentaa varten mallin perusteella tehtiin yksinkertainen, mutta samalla mahdollisimman realistinen versio lastiluukusta. Lujuuslaskentamallista pyritään jättämään pois kaikki luukun lujuuden kannalta epäoleellinen. Lujuuslaskentamalliin ei mallinneta esimerkiksi luukun kiinnitysosia, jäykisteet ja tuet tulee kuitenkin mallia tehdessä huomoida. [3]

Alkuperäisestä mallista mallinnettiin puolikas lujuuslaskentaa varten, joka näkyy kuvassa 4.1. Lastiluukku on symmetrinen poikittaiseen suuntaan laivaan nähden, joten puolitettu malli antaa riittävän realistisen kuvan lastiluukun lujuusominaisuuksista. Mallin puolituksella haluttiin myös lyhentää laskenta-aikoja. Käytännön laskennassa jouduttaneen käyttämään myös kokonaista mallia luukusta, jotta myös



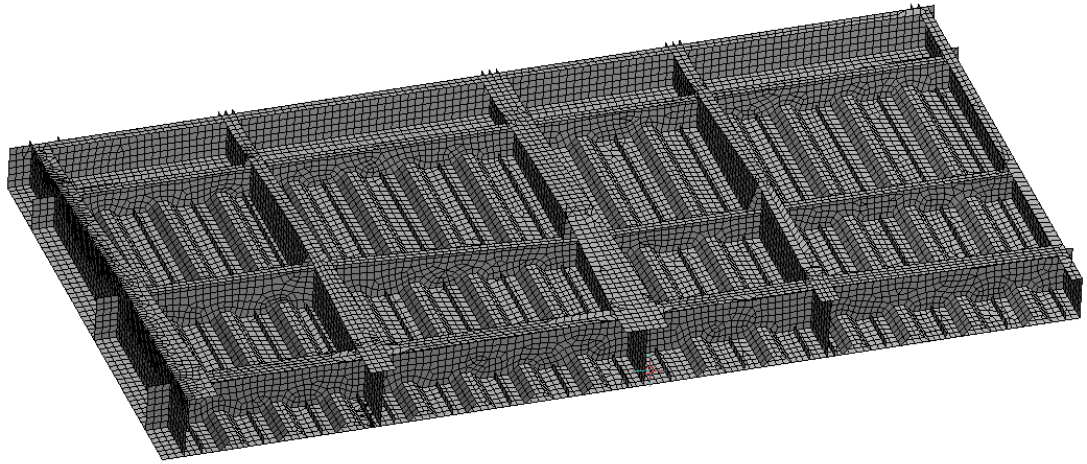
Kuva 4.1: Puolikas konttilaivan lastiluukku kuvattuna viistosti alhaalta. Symmetria on laivaan nähden poikittaisuuntainen.

mahdolliset epäsymmetriset kuormitustapaukset saadaan huomioitua. Epäsymmetrisyyttä lastiluukun kuormitustapauksessa aiheuttaa 20-jalkaa pitkän kontin aikaansaamat piste kuormat.

Perusmalli kannattaa tehdä niin, että se on riittävän monipuolisesti käytettävissä ja muunneltavissa, esimerkiksi jäykistejakoa saatetaan joutua muuttamaan. Lastiluukusta tehty malli koostuu kannesta, pitkittäisistä ja poikittaisista tukipalkeista sekä oleellisimmista kannen jäykisteistä. Lommahdusanalyysiä varten tehtiin erillinen CAD-malli, johon mallinnettiin optimoinnissa tarvittavat lommahdustikut.

Tarjousvaiheessa asiakas antaa lastiluukulle päämitat, jotka voidaan asettaa pysyviksi mitoiksi. Sen jälkeen huomioidaan jo lastiluukun CAD-mallia tehtäessä myöhemmin optimoinnissa tarvittavat suunnitteluparametrit. Malli on muodostettava niin, että esimerkiksi laipan tai kannen osan leveyden muuttaminen ei riko mallia.

SolidWorks-ohjelmassa on huomioitu FEM-mallinnus lisäämällä malliin jo valmiiksi useita nimivalintoja, jotka voidaan myöhemmin parametrisoida. Nimivalinnoilla voidaan kohdentaa tietty toiminto tietylle geometriselle osalle, elementille tai solmulle. Nimivalinnat kannattaa tehdä mahdollisimman pitkälle jo CAD-ohjelmassa, sillä ANSYS ei aina talleta siinä määriteltyjä nimivalintoja, jos CAD-mallia muutetaan myöhemmässä vaiheessa. Erityisesti, jos laskettava malli on uusi voidaan lujuuslaskentavaiheesta joutua vielä palaamaan CAD-ohjelmaan muuttamaan rakennetta.



Kuva 4.2: Konttilaivan lastiluukun elementtiverkko

Lastiluukunmalli tässä työssä on mallinnettu luomalla ensin kansi pintana. Sen jälkeen kansilevyn päälle on luotu vaihe vaiheelta tukipalkit. Koko lastiluukku on mallinnettu kuorimallina, joten luukun eri osille luodaan ainoastaan reunamitat, ei paksuutta. Osien paksuus määritellään ANSYS-ohjelman Workbench-ympäristössä.

4.2 ANSYS Workbench

CAD-malli tuotiin import-komennolla ANSYS:iin. Lujuuslaskentamalli on verkotettu ANSYS-ohjelman automaattisella verkotuksella. Kuvassa 4.2 on esitetty lastiluukun verkotettu elementtimalli. Elementin kooksi on asetettu 0.150 m, jolloin elementtejä esimerkin lastiluukulle tulee 12641 kappaletta. Verkon kokoa on hieman käsin säädetty, jotta elementtien määrä on saatu riittävän alhaiseksi. Kokonaisella mallilla laskettuna elementtien määrä olisi noussut suureksi ja laskenta-aika pidentynyt tarpeettoman paljon.

Lujuuslaskentamallin luonnin yhteydessä parametrisoidaan kaikki tarvittavat muuttujat, kuten päämitat ja erilaiset kuormitustyyppit. Parametrisointia varten pitää lujuuslaskentamallista tehdä sopivia, jollei riittäviä nimivalintoja ole tehty jo CAD-mallissa. Lastiluukun optimoinnin yhteydessä on parametrisoitu muun muassa kanen ja tukipalkkien ainepaksuudet sekä rakenteen massa. Koko lastiluukku tehdään tässä tapauksessa samasta materiaalista, joten materiaalia ei tarvitse huomioida mallinnuksen yhteydessä.

Koska käytössä on kuorimalli, tulee pintojen paksuudet määritellä erikseen. Nimivalintoja hyödyntäen ja parametrisoitavuuden huomioiden on kaikille pinnoille annettu oma paksuus. Esimerkiksi kannen paksuus muilta paitsi optimoitavilta osilta on 8mm.

ANSYS:lla on oma ohjelmointikieli, jolla voidaan ohjelmoida aliohjelmia ANSYS-ohjelmaan. APDL tulee sanoista ANSYS Parametric Design Language eli ANSYS-ohjelman oma parametrinen suunnittelukieli. APDL-koodia on hyödynnetty esimerkiksi lastiluukun massan määrittämisessä.

4.2.1 Elementtityyppi

Lastiluukun laskennassa on käytetty ANSYS:n nelisolmuista SHELL181 kuorielementtiä. Jokaisella elementin solmulla on kuusi vapausastetta: translaatiot x -, y - ja z -suuntiin sekä rotaatiot x -, y -, ja z -akselien ympäri. Elementti sopii hyvin lineaarisille, suuren rotaation sekä suurten venymien epälineaarisille sovelluksille. [8]

Luokituksen mukaisessa laskennassa mallin verkotukseen tulisi käyttää enemmän huomiota: Elementtien koon tulee olla sopiva suhteessa koko malliin. Lisäksi elementtien on oltava jäykisteiden välistä etäisyyttä suurempia, eikä elementin pituuden suhde leveyteen saa olla yli neljä. Lisäksi ensisijaisesti tukevan kohdan uumassa ei elementin korkeus saa ylittää yhtä kolmasosaa uuman korkeudesta. [3]

4.2.2 Reunaehdot

Jos elementtimenetelmällä lasketaan todellisia tilanteita, on tärkeä löytää rakenteelle sopivat reunaehdot. Virheelliset tai todellisuudesta liian kaukana olevat reunaehdot vääristävät tuloksia ja siten lisäävät analyysin epäluotettavuutta.

Tässä mallissa luukun tuenta on mallinnettu lastiluukun reunoilla sijaitsevilla pistemäisillä tuilla, jotka vastaavat luukun aitoja tukipisteitä. Tukipisteet on määriteltä siirtymättömiksi. Tukien paikat on määritetty nimivalintojen avulla.

Luukun mallinnuksessa huomioitu symmetria tulee huomioida myös reunaehdoissa. Jotta puolikas lastiluukku käyttäytyisi lujuuslaskennallisesti kuin kokonainen luukku, on symmetriatasolta zy estetty z - ja y -suuntaiset rotaatiot. Lisäksi kannen tasolta on estetty symmetriareunan x -suuntainen liike.

4.3 Simpro

Simpro on optimointityökalu, joka tarjoaa rajapinnan käyttäjän ja optimointiohjelmien välille. Siinä käyttäjä voi itse valita käytettäväksi esimerkiksi MATLAB:n tai optimointiohjelmisto Gurobin optimointialgoritmeja. Käyttäjä voi itse valita, mitä optimointialgoritmia kulloinkin tarvitsee. Lastiluukun rakenteen optimoinnissa

on käytetty diskreettien joukkojen optimointia. Hyvään lopputulokseen päästäisiin myös käyttämällä Simplex-algoritmia tai sisäpistemenetelmää.

Sekä kohdefunktio että rajoitusehdot on mallinnettu käyttäen lineaarista vastepintamenetelmää. Lineaarisuus mahdollistaa yksinkertaisten, mutta tehokkaiden optimointialgoritmien kuten Simplexin ja sisäpistemenetelmän käytön. Muita käytettäviksi valittavia regressiomalleja ovat kvadraattinen, puhtaasti kvadraattinen malli. Käytettävä malli vaikuttaa koepisteiden määrään. Lineaarista mallia käytettäessä koepisteiden minimimäärä N on

$$N = k + 1, \quad (4.1)$$

missä k on tehtävän suunnittelumuuttujien määrä. Jos koepisteitä halutaan laskettavaksi lisää, voidaan käyttää puhtaasti kvadraattista mallia, joka ei sisällä ristitermejä. Silloin lasketaan koepisteitä

$$N = 2k + 1, \quad (4.2)$$

kappaletta. Jos malliin otetaan toisen kertaluvun ristitermit kasvaa koepisteiden määrä, jolloin koepisteiden määräksi tulee

$$N = \frac{1}{2}k^2 + \frac{3}{2}k + 1, \quad (4.3)$$

Yleisesti koesuunnittelussa on tärkeää selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat tutkittavaan asiaan. Lastiluukku optimoitaessa on selkeää, että luukun osien paksuudet vaikuttavat suoraan lastiluukun teräspainoon. Osien paksuuksilla on myös vaikutusta luukun lujuusominaisuuksiin. Koesuunnittelussa on selvitetävä lisäksi, mitkä ovat luukun kestävyysvaikutukset rajoitteet. Esimerkiksi, kuinka paljon lastiluukun kannen on sallittua taipua kuormituksen alaisena.

Suunnittelumuuttujat voivat olla jatkuvia, diskreettejä tai binäärisiä. Lastiluukku koskevista esimerkeistä on hyödynnetty diskreettejä ja binäärisiä suunnittelumuuttujia. Rakenteen optimoinnissa on hyödynnetty tietoa mitoituksen rajoitteista lastiluukun dimensioiden suhteen. Mitat lasketaan suoraan niille mahdollisilla luvuilla. Esimerkiksi, jos laipan paksuudella on käytännössä vaihtoehdot 10 mm, 20 mm ja 30 mm on laskennassa hyödynnetty tätä tietoa ja optimointi on suoritettu niin, että vain käyvät mitat ovat mukana optimoinnissa.

4.3.1 Metamalli

Optimoinnin aikana alkuperäinen elementtimalli korvataan metamallilla (surrogate model). Metamalli käy nopeasti ja laskennallisesti tehokkaasti läpi lukuisia rajoitefunktion arvoja. Lastiluukun tapauksessa on käytetty lineaarista mallia. Käytetty

vastepintamenetelmä perustuu ennalta määriteltyihin polynomisiin kantafunktioihin. ANSYS-ohjelman Workbench ympäristössä vastepintamenetelmän käyttö perustuu FEM-mallin parametrisointiin. Parametrien eri arvojen yhdistelmillä laskeaan analyysejä, joiden pohjalta muodostetaan vastepinnat. [9]

Tärkeä tekijä metamallin hyödyntämisessä on approksimoinnista aiheutuvan virheen käsittely. Virheen suuruus riippuu merkittävästi approksimoidun alueen aliavaruuden koosta, suunnittelu- ja koepisteiden sijainnista, määrästä sekä vasteen approksimointiin käytetyistä kantafunktioista. Vastepintamenetelmän tapauksessa se tarkoittaa, mitä suurempi aliavaruus sitä enemmän tarvitaan korkeamman asteen kantafunktioita. On kuitenkin todettu, että yksinkertaisimmat lineaariset kantafunktiot saattavat johtaa tehokkaimpaan menetelmään. [4]

Tavoitteena on selvittää, miten vasteen y arvot riippuvat $n:n$ faktorin

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (4.4)$$

arvoista. Vastepintamenetelmässä pyritään löytämään faktoreiden x_1, x_2, \dots, x_i tasojen kombinaatio, jolla saadaan vastefunktiolle $y(\mathbf{x})$ optimi arvo. Monissa tapauksissa funktion $y(\mathbf{x})$ muoto on tuntematon, joten funktiota joudutaan approksimoimaan faktoreiden polynomilla. [10]

Polynomisessa regressiomallissa tuntematon funktio muodostetaan käyttäen joko lineaarista vastepintamallia

$$y(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \epsilon \quad (4.5)$$

tai toisen asteen vastepintamallia

$$y(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq 1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (4.6)$$

jossa x_i on kerättyinä vektori \mathbf{x} ja ϵ edustaa satunnaisvirhettä vastemuuttujan y arvoissa. Deterministisissä tapauksissa satunnaisvirhe on nolla. Jos koepisteiden määrä on suurempi kuin kertoimien β_0 , β_i , β_{ii} ja β_{ij} määrä, voidaan regressioanalyysiä hyödyntää pienentämällä pintaa, jolloin tietyt virhearvot ovat minimoituja.

Kertoimet β_0 , β_i , β_{ii} ja β_{ij} voidaan listata vektoriin $\boldsymbol{\beta}$, joka voidaan ratkaista esimerkiksi käyttäen pienimmän neliösumman metodologia, jolloin yhtälöksi muodostuu

$$\boldsymbol{\beta} = [\mathbf{X}^T \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4.7)$$

jossa \mathbf{X} on matriisi, joka sisältää koepisteet ja \mathbf{y} on vektori, joka sisältää estimoidun funktion arvot koepisteissä.

Koepisteiden lukumäärä ja niiden paikat voidaan määritellä muutamalla eri me-

netelmällä. Yksi tapa on käyttää D-optimia menetelmää, jossa käytetään pienintä mahdollista koepisteiden lukumäärää. Lineaarille mallille minimimäärä koepisteitä on $N + 1$. Käytettäessä pienintä määrää suunnittelupisteitä estimaatimaatiovirheen arvoksi saadaan koepisteissä nolla.

Ensimmäisenä valitaan optimoinnin aloituspisteet. Linearisessa vastepintamenetelmässä vasteet jakautuvat kohteena olevalle alueelle eli niin kutsutulle ROI-alueelle (Region of Interest). Vasteet jakautuvat keskitetysti aloituspisteen \mathbf{x}^0 ympärille, jolloin

$$(1 - \alpha^1)\mathbf{x}_i^0 \leq \mathbf{x}_i \leq (1 + \alpha^1)\mathbf{x}_i^0 \quad (4.8)$$

jossa α^1 on alkuarvon säde kohdealueella eli ROI:lla. Alue valitaan kokemuksen perusteella ja \mathbf{x}_i^1 on alkuarvo suunnittelumuuttujalle \mathbf{x}_i . Lisäksi lasketaan todelliset vasteet kohdealueen keskellä ja tuloksia verrataan estimoituihin tuloksiin, jolloin saadaan laskettua approksimoinnista aiheutuva virhe. Käyttäjä päättää tapauskohtaisesti, onko approksimaatiovirhe sallituissa rajoissa vai ei.

Kun metamalli on muodostettu lineaarisilla vastepinnoilla, voidaan optimointitehtävä ratkaista tehokkaasti käyttäen sisäpistemenetelmää tai simplex-algoritmia. Yksinkertaisten kohde- ja rajoitefunktioiden sekä analyttisyyden vuoksi optimointi on nopeaa.

Iteraatiokierroksilla aliavaruuden koko muuttuu adaptiivisesti, joten approksimoinnista aiheutuva virhe on mitattaessa kohdealueen keskeltä hyväksyttävä. D-optimaalisella menetelmällä on taipumus sijoittaa suunnittelupisteet kohdealueen kulmiin. Edellä mainituista syistä estimaatiovirheen määrittämiseen luonnollinen sijainti on keskellä kohdealuetta. Kohdealueen säde α on muokattu sopimaan edellä määritellyyn hyväksytyyn virheeseen \bar{e}

$$\alpha^{j+1} = \frac{\max(\frac{\hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i}{\mathbf{y}_i})}{\bar{e}} \alpha^j \quad (4.9)$$

jossa yläindeksi j merkitsee iteraatiokierrosta ja alaindeksi i laskettua vastetta, $\hat{\mathbf{y}}$ on todellinen arvo ja \mathbf{y} estimoitu arvo, joka liittyy vasteeseen, joka on laskettu kohdealueen origossa. Kohdealueen säteen maksimimuutos on rajoitettu 50% oskilloimisen välttämiseksi. Optimointikierroksella j vastepintamalli määritellään niin, että kohdealueen origo on optimipisteessä \mathbf{x}^{j-1} , joka on määritetty edellisellä iteraatiokierroksella $j - 1$ käyttäen ROI:n rajoitteita

$$(1 - \alpha^j)\mathbf{x}_i^{j-1} \leq \mathbf{x}_i^j \leq (1 + \alpha^j)\mathbf{x}_i^{j-1} \quad (4.10)$$

Jos muodostettu ROI risteytyy globaalin suunnittelumuuttujarajoituksen kanssa, siirretään sitä takaisin käyväälle alueelle. [4; 11]

4.4 Mitoituksen periaatteita

Tarjousvaiheessa on tärkeää selvittää riittävän tarkasti lastiluukun massa. Lastiluukun raaka-aineiden kustannukset riippuvat niiden käytetystä määrästä. Tarjous- ta tehtäessä halutaan tietää mikä on karkeasti arvioiden luukun minimimassa, ja rakenne, jolla luukku kestää siihen kohdistuvat kuormitukset. Optimointitehtäväs- sä massaa minimoidaan huomioiden luukun lujuus- ja stabiilisuusehtoihin liittyvät rajoitusyhtälöt. Optimoinnissa huomioidaan luokituslaitoksen antamat ohjeet lasti- luukun vaatimuksista.

Lastiluukun massa parametrisoidaan käyttäen seuraavaa APDL-koodia

```
*get, my_massa, elem, 0, mtot, x
```

Jälkikäsitteilyssä etuliitellä *my_* voidaan ulos tuleva vaste parametrisoida. Massaa laskettaessa koodi tulostaa analyysin jälkeisen massan arvon, joka ottaa huomioon mahdollisesti muuttuneiden rakenteen osien paksuuksien aiheuttaman massan muu- toksen.

Optimointitehtävässä eri osien paksuudet eli tehtävän suunnittelumuuttujat on nimetty nimivalintojen avulla. Suunnittelumuuttujat on parametrisoitu käyttäen si- sääntulo (input) argumentteja, jotka on määritelty APDL-kommentojen avulla. Ar- gumentit parametrisoidaan rastittamalla siihen liittyvä ruutu.

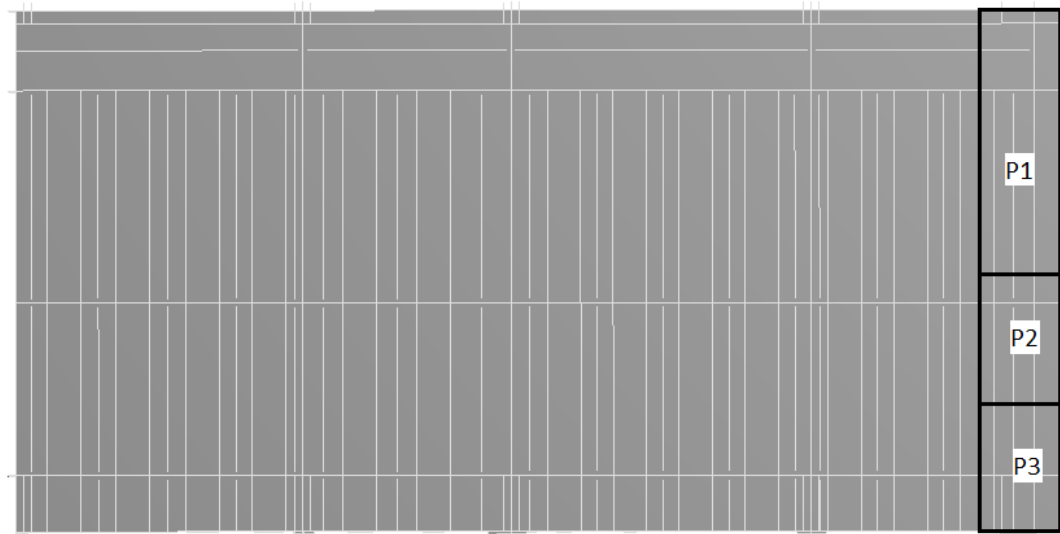
Kansilevystä suurin osa on vakioitu paksuudelle 8 mm. Levyn päädyssä on kolme optimoitavaa aluetta, jotka on merkitty kuvaan 4.3. Optimoitavien alueiden leveys on vakioitu 1000 mm. Pituussuuntaisten saumojen paikat voidaan vakioda. Mini- mipaksuus kannelle on 7 mm sisältäen 1 mm korroosiovaran.

Laipat optimoidaan 10 mm välein. Pienimmillään laipan paksuus voi olla 20 mm ja isoimmillaan 60 mm. Symmetristen laippojen optimoinnissa maksimoidaan laipan leveys. Epäsymmetristen laippojen kohdalla leveys kannattaa puolestaan minimoida. Laippojen pituussuuntaisten saumojen paikat on vakioitu.

Pituuspalkkien uumien paksuudet sijoittuvat 7 mm ja 17 mm välille. Kuten lai- poilla myös uumilla pituussuuntaisten saumojen paikat on vakioitu. Uumien korkeu- det on vakioitu ja ne määräytyvät paneelille annetun rakennekorkeuden mukaan.

Rajoitusehdot muotoillaan luokituslaitoksen ohjeiden, kokemuksen, sekä asiak- kaan mahdollisten toiveiden mukaisesti. Ehdot parametrisoidaan käyttäen apuna tarvittaessa APDL-koodia. Rajoitusehdot voivat koskea esimerkiksi lastiluukun tai- pumaa tai jännitystä.

Lastiluukun taipuminen aiheuttaa ongelmia konttien pinoamisessa. Konttipino- jen noustessa korkeiksi tulee niiden pysyä erillään toisistaan, jolloin niiden alla oleva lastiluukku ei saa taipumallaan aiheuttaa konttipinojen kallistumista. Luokitus ei ra- joita sallittua taipumaa hyötykuorman (konttipinon aiheuttamat kuormat) tapauk- sissa. Sääkuorman aiheuttaman tasaisen kuormituksen tapauksessa sallittu taipuma



Kuva 4.3: Kannen paksuuden parametrisointi

on $0,0056 \times$ jänneväli. Tästä seuraa se ettei taipuma varsinaisesti mitoitaa lastiluukua sillä konttien aiheuttamat voimat ovat niin suuria, että ne mitoittavat luukun riittävän kestäväksi. [3]

Luokituslaistos ohjeistaa lastiluukulle tietyt jännitykset, joita lastiluukku ei saa ylittää. Sallitut jännitykset ovat riippuvaisia tarkastellusta lastiluukun osasta. Jokaisesta rakenteen osien muodostamasta ryhmästä voidaan osoittaa kokemuksella tai vertailemalla aiempia tuloksia jännitykselle kriittisimmät alueet. Tutkittavia ryhmiä ovat esimerkiksi laipat, uumat ja kansilevyt. Kriittisiä alueita ovat ne, joilla lommahdus on aktiivisimmillaan sekä ne, jotka kokemuksella tiedetään kriittisiksi. Laskennan keventämiseksi ja nopeuttamiseksi voidaan jännitystarkastelut suorittaa vain näillä alueilla.

Teräksestä valmistetun lastiluukun vonMises-jännitys σ_v suhteessa lastiluukun nettopaksuuteen eli paksuuteen ilman korroosiolisiä, ei saa ylittää $0,8\sigma_F$, jossa σ_F on materiaalin myötöraja. Elementtimenetelmällä laskettaessa, jos käytössä on kuori- tai jännityselementtejä, jännitys ei saa ylittää $0,9\sigma_F$, missä σ_F . Käytettäessä kuori- tai tasovenymäelementtejä jännitykset luetaan luokituksen säännön mukaisesti elementin keskeltä. Lastiluukun jännitysten tarkastelua varten luodaan omat lommahduksista riippumattomat polut, joilta lasketaan elementtien keskiarvoisia jännityk-

siä. [3]

Kun nimivalinnat ja APDL-kommentit sekä esi- että jälkikäsitteilyä varten on luotu, on parametrisoitu lujuuslaskentamalli valmis. Käyttäjä voi edelleen halutessaan muuttaa geometriaa, kuormituksia ja tarvittaessa käytettyjä materiaaleja tarpeensa mukaisesti.

4.5 Esimerkki lastiluukun rakenteen optimoinnista

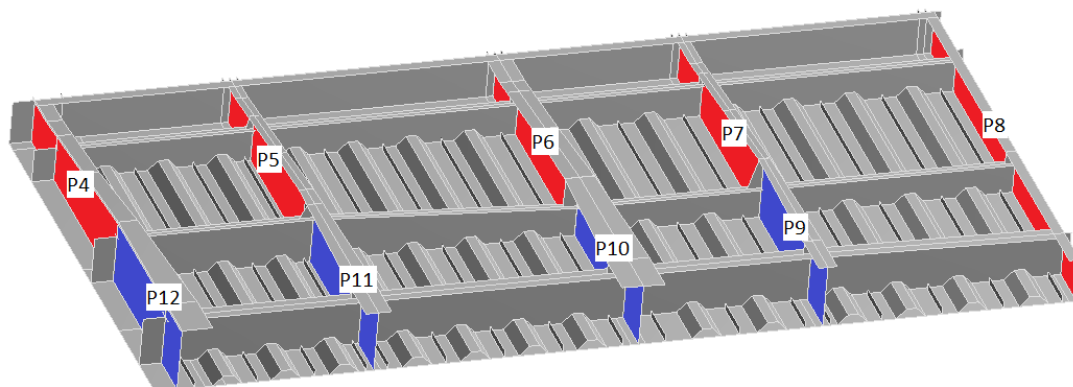
Optimointiesimerkkinä lasketaan lastiluukun rakenteen paksuus. Rakennetta kuormitetaan 0,02 MPa tasaisella painekuormalla kohtisuoraan kantta vasten sekä pistemäisesti puristaen konttipinojen kiinnityskohdista 500 kN voimalla. Paineekuormitus jäljittelee todellisen luukun laskennassa käytettävää sääkuormaa ja pistemäinen puristus konttipinojen satamaolosuhteissa lastiluukkuun kohdistamaa voimaa. Kuormitustapaukset käsitellään erillisinä tapauksina tavoitteena minimoida rakenteen teräspaino eli sen massa. Rajoitteena on käytetty koko rakenteen maksimideformaatiota, jonka sallitaan painekuorman tapauksessa olevan enimmillään 10 mm ja pistemäisellä puristuksella 12 mm. Käytännön tilanteessa lastiluukun sallitaan taipuvan noin 40-50 mm. Vasteet alkutilanteessa on esitetty taulukossa 4.1.

Optimoitavat rakenteen osat ja niiden parametrisointi on esitetty kuvissa 4.3, 4.4 ja 4.5. Muiden osien paksuudet on asetettu vakioiksi. Taulukossa 4.2 on esitetty optimointitehtävän suunnittelumuuttujat sekä niiden ala- ja ylärajat. Alkuarvoina käytetään tehtävän ylärajoja. Taulukkoon on merkitty ainoastaan ensimmäisen kuormitustapauksen parametrit. Laskennassa parametrisoidaan lisäksi toisen kuormitustapauksen suunnittelumuuttujien parametrit P28-P51, jotka vastaavat taulukon parametreja P1-P24. Toisiaan vastaavat parametrit on merkitty yhtä suuriksi ANSYS:n asetuksista, jolloin esimerkiksi P1=P28 ja P2=P29 ja niin edelleen, kunnes kaikki suunnittelumuuttujat on käyty läpi. Laskettavia suunnittelumuuttujia tehtävään jää yhteensä 24 kappaletta.

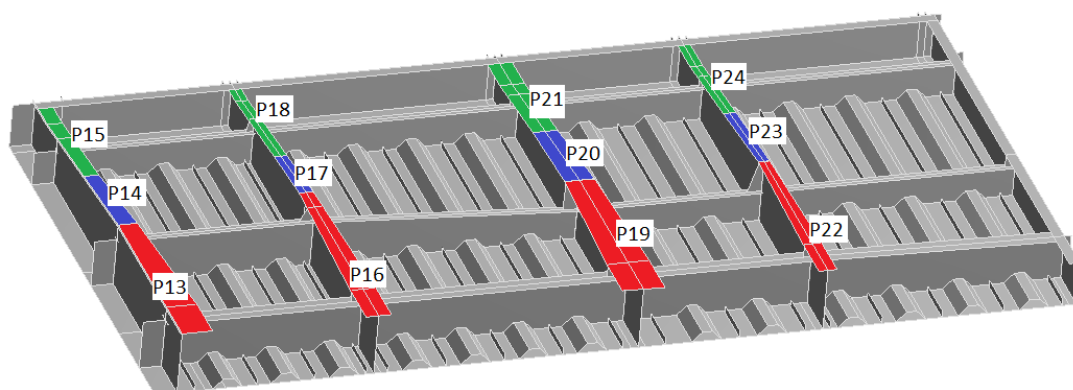
Rakenteen paksuudet optimoidaan hyödyntäen Simpro-ohjelmaa. Tehtävä oletetaan lineaariseksi, sillä rakenteen paksuuden muutos vaikuttaa suoraan kappaleen massaan. Optimoinnissa on käytetty diskreettejä joukkoja hyödyntävää optimointimenetelmää, jossa suunnittelumuuttujille määritellään tehtävän alussa tietyt paksuudet, jotka ovat tehtävässä sallittuja. Esimerkiksi laipan mahdolliset paksuudet

Taulukko 4.1: Vasteiden arvot alkutilassa

Vaste	Vasteen arvo alkutilassa	
P25 massa	19419	kg
P26 deformaatio	7,881	mm
P27 deformaatio	10,414	mm



Kuva 4.4: Uumien paksuuksien parametrisointi



Kuva 4.5: Laippojen paksuuksien parametrisointi

Taulukko 4.2: Suunnittelumuuttujien arvot alkutilassa

Suunnittelumuuttuja	Alaraja [mm]	Alkuarvo/Yläraja [mm]	Optimi [mm]
P1 kannen paksuus	7	20	10
P2 kannen paksuus	7	20	10
P3 kannen paksuus	7	20	10
P4 uuman paksuus	7	20	8
P5 uuman paksuus	7	17	9
P6 uuman paksuus	7	17	12
P7 uuman paksuus	7	17	8
P8 uuman paksuus	7	17	9
P9 uuman paksuus	7	17	8
P10 uuman paksuus	7	17	8
P11 uuman paksuus	7	17	8
P12 uuman paksuus	7	17	8
P13 laipan paksuus	20	60	30
P14 laipan paksuus	20	60	30
P15 laipan paksuus	20	60	30
P16 laipan paksuus	20	60	30
P17 laipan paksuus	20	60	30
P18 laipan paksuus	20	60	30
P19 laipan paksuus	20	60	30
P20 laipan paksuus	20	60	30
P21 laipan paksuus	20	60	30
P22 laipan paksuus	20	60	30
P23 laipan paksuus	20	60	30
P24 laipan paksuus	20	60	30

Taulukko 4.3: Vasteiden arvot optimirakenteelle

Vaste	Tarkka arvo	Mallin antama arvo	Virhe %
P25 massa	15386.98	15386.98	0,0
P26 deformaatio	9.97	9.98	0,1
P27 deformaatio	11.68	11.80	1.0

ovat 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm ja 60 mm. Muilla osilla käytetään arvoja rajojen sallimissa rajoissa yhden millimetrin välein. Vastaava optimointitehtävä voitaisiin ratkaista myös muilla optimointialgoritmeilla, kuten optimoinnin teoriaa käsittelevässä luvussa esitellyillä sisäpistemenetelmällä ja Simplex-algoritmillä.

Esivalmisteluilla muokataan lastiluukun optimointitehtävä muotoon

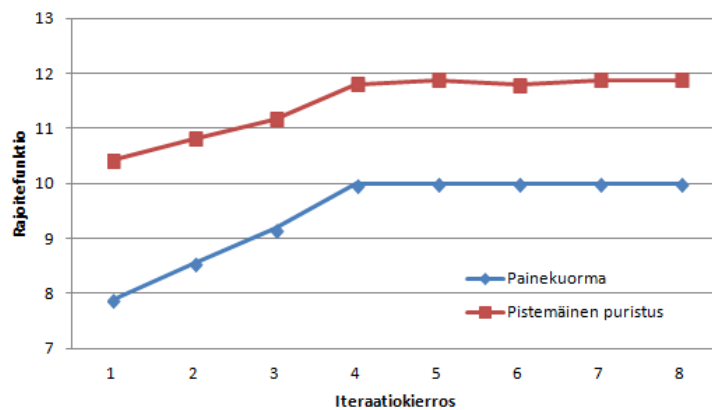
$$\min m(\mathbf{x}) \quad (4.11)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \quad (4.13)$$

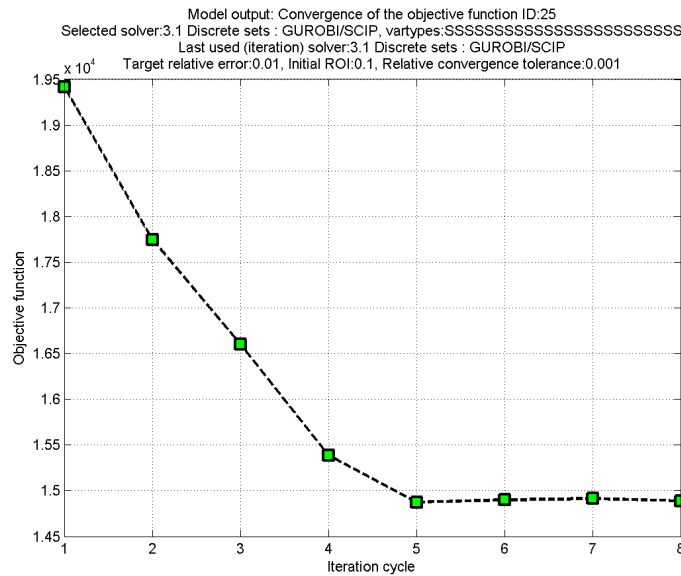
jossa m on rakenteen massa, \mathbf{x} on vektori, joka sisältää suunnittelumuuttujat ja \mathbf{g} on rajoitusehdot sisältävä vektori. Alaindeksit l ja u merkitsevät ala- ja ylärajoja. Jos kohdefunktioita olisi enemmän kuin yksi, olisi kyseessä monitavoiteoptimointiongelma. Suunnittelumuuttujat ovat kokomuuttujia eli tässä esimerkissä paksuusmuuttujia. Rajoitusehtona tässä esimerkissä käytetään pelkkää siirtymää. Laskettaessa todellista tapausta rajoitusehtona olisi siirtymän lisäksi jännitys- ja lommahdusfunktio.

Kun tehtävän alkutiedot on asetettu Simpro-ohjelmalle lähettää, ohjelma tehtävän laskenta-ohjelmalle, joka laskee metamallia varten datamatriisin. Koepisteitä datamatriisia varten lasketaan $N+1$ eli 25 kappaletta, missä N vastaa suunnittelumuuttujien lukumäärää. Laskenta suoritetaan ANSYS-ohjelman avulla. Saatujen tulosten avulla muodostetaan vastepinta. Ensimmäisen optimointikierron jälkeen rakenteen massa on pienentynyt yli 1600kg, kuten kuvista 4.7 ja 4.8 voidaan havaita. Malli ei kuitenkaan ole vielä saavuttanut optimiratkaisua, joten optimointia jatketaan.



Kuva 4.6: Metamallin mukainen rajoitefunktion suppeneminen kohti raja-arvoa

Optimointitehtävän iterointi päättyy, kun jokin lopetusehdoista täyttyy. Lope-



Kuva 4.7: Metamallin mukainen kohdefunktion suppeneminen

tusehtona voidaan käyttää esimerkiksi iteraatiokierrosten määrää tai kohdefunktion muutosta suhteessa edelliseen kierrokseen

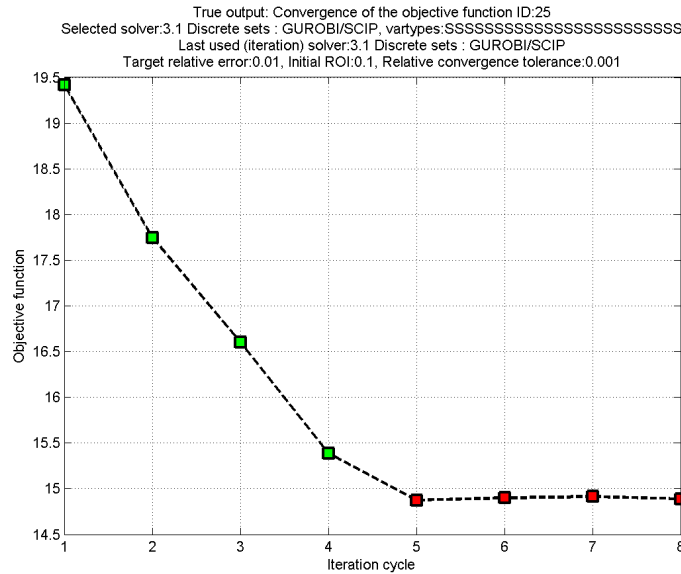
$$\frac{m^j - m^{j-1}}{m^j} \leq \textit{toleranssi} \quad (4.14)$$

missä yläindeksi merkitsee iteraatiokierrosta. Toleranssin arvoksi on tehtävää määriteltäessä asetettu 0,001, joten iterointi päättyy heti, kun kohdefunktion arvo muuttuu alle 0,1% verrattuna edellisen kierroksen arvoon. [4]

Tässä esimerkissä iteraatiokierroksille on asetettu maksimimääräksi 15 kierrosta. Iteraatiokierroksia lasketaan kuitenkin vain kahdeksan, sillä lopetusehto täyttyy aiemmin. Kuvasta 4.6 nähdään, että neljännellä iteraatiokierroksella molempien tapausten rajoitefunktiot ovat jo hyvin lähellä sallittuja arvojaan. Vertaamalla kuvia 4.7 ja 4.8 voidaan havaita, että neljännen iteraatiokierroksen jälkeen todellisen mallin antama tulos ei ole enää käypä, sillä kuvaaja muuttuu punaiseksi. Värien vaihdoksen syynä vihreästä punaiseen on rajoitusehtojen rikkominen. Kuvaajien sekä laskennan antamien tulosten perusteella voidaan sanoa, että neljännen iteraatiokierroksen ratkaisu on tehtävän optimipiste, jollei rajojen rikkomista hyväksytä.

Suunnittelumuuttujien arvot optimipisteessä on esitetty taulukossa 4.2. Taulukosta nähdään, että yksikään muuttuja ei päädy ala- eikä ylärajalleen. Taulukossa 6.1 on esitetty vasteiden arvot optimipisteessä. Massan tarkka arvo ja mallin antama arvo eivät odotetusti poikkea toisistaan, sillä malli käyttäytyy lineaarisesti. Meta-mallin ja todellisen mallin antamissa deformaation arvoissa on pientä eroavaisuutta.

Todellisessa tilanteessa lastiluukun laskennassa käytettäisiin huomattavasti enem-



Kuva 4.8: Lujuuslaskentamallin mukainen kohdefunktion suppeneminen

män rajoitusehtoja, joiden lisäksi käytännön tilanteessa esimerkin tapaukseen tulisi lisätä muun muassa esimerkiksi pois jätetyt kuormitustapaukset. Tällä esimerkillä halutaankin havainnollistaa menetelmän käyttöä lastiluukun optimoinnissa, ei niinkään todellisen lastiluukun lujuuslaskentaa. Aikaa tämän esimerkin laskentaan kului noin 30 minuuttia. Jos optimoinnin tulosta halutaan vielä tarkentaa, voidaan optimointi suorittaa uudelleen aloittaen ensimmäisen optimointikierroksen optimipisteestä. Käytännössä uudella optimointikierroksella ei kuitenkaan saavuteta esimerkiksi tarjouslaskentaa varten merkittävää parannusta tuloksiin.

4.6 Muodon optimointi

Konttilaivan lastiluukun optimoinnissa haasteena on luukun laippojen leveyden optimointi. Luukussa on sekä tasaisesti leveitä että kapenevia laippoja. Geometrian muuttuminen optimoinnin seurauksena hidastaa optimointia. Geometrian optimointi voidaan mahdollisesti kiertää optimoimalla laipan leveyden sijasta laipan paksuutta.

Laipan optimointia testattiin käyttäen ANSYS:n omaa optimointia sekä Simpron optimointia. Optimointi toimi, mutta laskenta-aikaa kului huomattavasti enemmän verrattuna edellä esitettyyn paksuuden optimoimiseen. Käytännön laskennassa aikaa yhden luukun laippojen laskentaan käytettäväksi ei ole paljoa, joten optimointiin kuluvaa aikaa on saatava lyhyemmäksi, jotta leveyksiä voitaisiin käytännössä optimoida.

Mahdollisia ratkaisumalleja ongelman ratkaisemiseksi on useita. Simpron avulla laskettuna optimointiaikaa voidaan hieman lyhentää, sillä sen välityksellä toimi-

vat optimointialgoritmit ovat ANSYS:en algoritmia tehokkaampia. Lisäksi Simpron avulla voidaan hyödyntää laskennan hajauttamista useamman koneen laskettavaksi, jolloin laskenta-aika pienenee jo merkittävästi. Toisena vaihtoehtona on etsiä paksuudelle ja leveydelle yhteys, jonka avulla optimoitu laipan paksuus voidaan muuntaa laskennan jälkeen esimerkiksi taulukon tai lyhyen laskutoimituksen jälkeen leveydeksi. Kolmantena ratkaisumallina voidaan pitää laipan leveyden laskemista APDL-koodin avulla, jolloin vältetään varsinaisen lastiluukun geometrian muokkaamiselta.

Ensimmäisen ja kolmannen menetelmän etuna on niiden helppo yhdistäminen edellä esitetyn lastiluukun paksuuden optimointiin. Käytännössä lastiluukun osien paksuutta ja leveyksiä lasketaan yhtäaikaaisesti, joten olisi helpointa, jos saman optimointitehtävän lopputuloksena saataisiin ratkaisut molempiin. Ennen kuin yksikään edellä esitetyistä menetelmistä on toimintakelpoinen käytännön työssä, on niitä tutkittava ja testattava lisää.

5. LOMMAHDUSTARKASTELUT

Lommahdus tarkoittaa siirtymien äkillistä kasvamista hyvin pienellä kuorman lisäyksellä. Lommahduksessa äkillinen stabiilisuuden menetys tapahtuu ilman murtumaa tai materiaalin irtoamista. Tässä luvussa käsitellään lommahdusta ja kolme menetelmää lommahdusten laskentaan. Esiteltyihin menetelmiin perustuvat esimerkit käydään läpi seuraavassa luvussa.

Työssä tutkitaan aiemmin kehitetyn laskentamenetelmän toimivuutta konttilaivan laskentaluukun lommahdusten laskentaan. Samalla selvitetään onko ANSYS:n omasta lineaarisesta lommahdusanalyysistä hyötyä lommahduskriittisten alueiden etsinnässä.

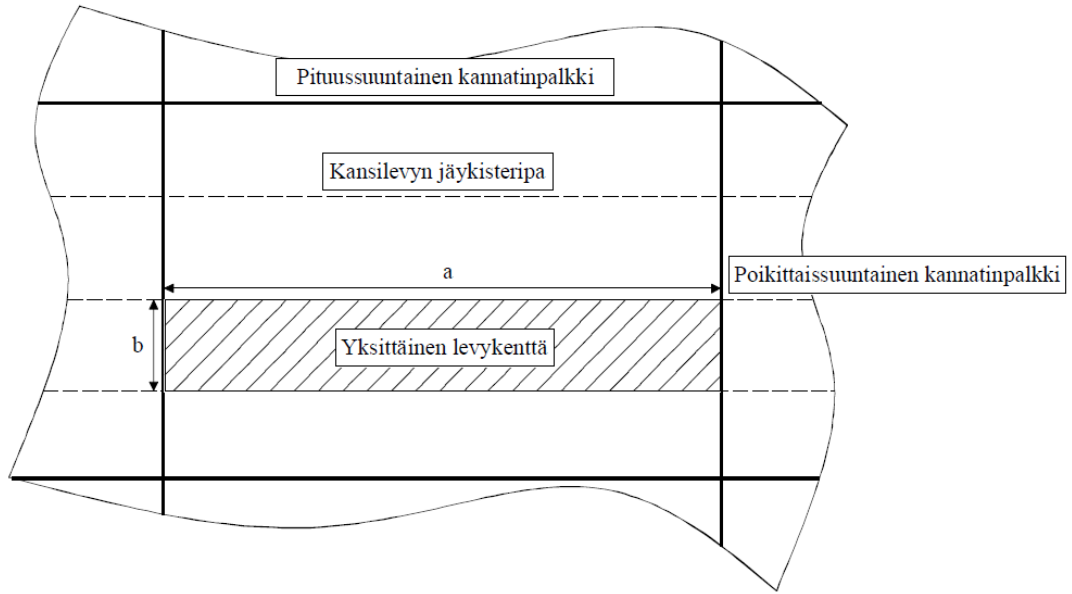
Lommahduksien ilmenemistä voidaan arvoida erilaisilla menetelmillä. Tässä yhteydessä on tutkittu lineaarisen lommahduksen ja luokituksen mukaisesti lasketun lommahduksen yhtäläisyyksiä ja seuraavuuksia. Tutkimuksen tavoitteena on löytää keino, jolla lommahdusten laskentaa voisi mahdollisesti nopeuttaa automatisoinnin avulla.

Lastiluukun lommahdukselle kriittisiä osia ovat kansilevy ja palkkien uumat. Lommahdusta tutkitaan näillä alueilla jakamalla ne pienempiin tutkittaviin alueisiin. Esimerkiksi kansi jaetaan lommahdustarkastelua varten levykenttiin, jotka rajautuvat kannatinpalkeista ja jäykisteistä kuvan 5.1 mukaisesti.

Jos lommahdustarkastelussa havaitaan, että tietty levykenttä lommahtaa, asetetaan kenttää tukemaan sekundaarinen jäykiste, jota kutsutaan lommahdustikuksi. Lommahdustikun tehtävä on estää levykentän lommahtaminen puolittamalla levykenttä. Lommahdustikkuja ei mallinneta lujuuslaskentamalliin, vaan niille määritellään ainoastaan paikat. [3]

Lineaarinen lommahdus eli ominaisarvo lommahdusanalyysi ennustaa ideaalisen kimmoisen rakenteen teoreettista lommahduslujuutta. Analyysi on sitä tarkempi, mitä lineaarisemmin rakenne käyttäytyy ennen lommahdusta. Kuitenkin monien todellisten mallien sisältämät epätäydellisyydet ja epälineaarisuudet estävät rakennetta saavuttamasta teoreettista elastista lommahduslujuutta. Täten lineaarinen lommahdustarkastelu tuottaa usein nopeita mutta epäkonservatiivisia tuloksia. ANSYS käyttää lommahdustarkastelussaan lineaarista lommahdusanalyysiä.

Tuloksena ANSYS-ohjelman lineaarisesta lommahdusanalyysistä saadaan estimaatti kriittisestä kuormasta eli kuormituskerroin λ_p , jolla tarkasteltu malli lom-



Kuva 5.1: Levykentän määrittäminen ja polkumenetelmään liittyvät dimensiot. Kansilevy on kuvattu suoraan ylhäältä päin. [9]

mahtaa. Kuormituskertoimen ollessa alle 1 rakenne lommahtaa laskennassa käytetyllä kuormalla. Jos kuormituskerroin on yli 1 rakenne kestää analyysin mukaan $\lambda_p \times$ kuorma suuruinen kuormituksen, ennen kuin se lommahtaa. [8]

5.1 Luokituksen mukainen lommahdustarkastelu

Luokituslaitoksen määräämä lommahdusehto levykenttien lommahdukselle on

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x \sigma_F} \right)^{e1} + \left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y \sigma_F} \right)^{e2} - B \left(\frac{\sigma_x \sigma_y S^2}{\sigma_F} \right) + \left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau \sigma_F} \right)^{e3} \leq 1 \quad (5.1)$$

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x \sigma_F} \right)^{e1}, \left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y \sigma_F} \right)^{e2}, \left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau \sigma_F} \right)^{e3} \leq 1$$

jossa σ_x ja σ_y ovat levykentän pituus- ja poikittaissuuntaiset normaalijännitykset, jotka ovat luokituksen säännön mukaan puristukselle positiivisia ja vedolle negatiivisia τ on levykentän leikkausjännitys, S on varmuusluku lommahduksen suhteen, σ_F on materiaalin myötöraja, B on jännitysten suunnasta riippuva kerroin, κ_x , κ_y ja κ_τ ovat vertailuhoikkuusluvusta λ riippuvia kertoimia, jotka määritellään taulukossa 5.1. Eksponentit $e1$, $e2$ ja $e3$ ovat κ -kertoimista riippuvia,

$$\begin{aligned}
B &= \begin{cases} (\kappa_x \kappa_y)^5 & \text{kun } \sigma_x \text{ ja } \sigma_y \geq 0 \\ 1 & \text{kun } \sigma_x \text{ ja } \sigma_y < 0, \end{cases} \\
e1 &= 1 + \kappa_x^4, \\
e2 &= \kappa_y^4, \\
e3 &= 1 + \kappa_x \kappa_y \kappa_\tau^2.
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Jännitykset kaavaan 5.1 saadaan elementtimenetelmästä. Vertailujännitys σ_e määritellään

$$\sigma_e = 0,9E \left(\frac{t}{b} \right)^2, \tag{5.3}$$

jossa E on materiaalin kimmomoduuli, t levykentän paksuus ilman korroosiovaraa ja b levykentän lyhyemmän sivun pituus.

Vertailuhoikkuusluku λ määritellään

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_F}{K\sigma_e}}, \tag{5.4}$$

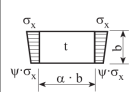
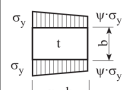
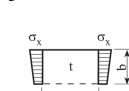
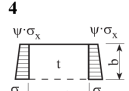
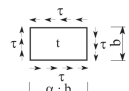
jossa K on kuormitustavasta riippuva lomahduskerroin. Lomahduskerroin määrityy luokan säännön mukaan, katso taulukko 5.1. Jännityssuhde ψ , joka esiintyy taulukossa 5.1 määritellään

$$\psi = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \tag{5.5}$$

jossa σ_{min} on levykentän reunalla esiintyvä pienin puristusjännitys tai suurin vetojännitys ja σ_{max} suurin levykentän reunalla esiintyvä puristusjännitys. Taulukon 5.1 kertoimen F_1 arvo riippuu pidemmän sivun reunojen tuentatavasta eli useimmiten jäykisteiden tyypistä. Esimerkiksi tämän työn lastiluukussa oleville trapetsijäykisteille $F_1 = 1,1$. [3]

Luokituksen mukainen laskenta voidaan toteuttaa luomalla niin kutsuttuja polkuja levykentille. Polku voidaan sijoittaa esimerkiksi keskelle levykenttää ja kuvata sen avulla kentän jännityksiä. Polulta otetaan tietty määrä näytteitä, joista lasketaan kaikkien jännityskomponenttien keskiarvo. Saatujen keskiarvoisten jännitysten avulla voidaan laskea luokituksen antamien ohjeiden mukainen analyysi.

Polkumenetelmän ongelmana on polkujen sijoittelu. Tällä hetkellä polkumenetelmä vaatii käyttäjältä polkujen omatoimista sijoittelua, jolloin haasteena on löytää ne paikat, joissa lomahdus todennäköisimmin esiintyy. Kokemuksen pohjalta polkujen sijoittelussa saattaa sattua virheitä, eikä polkua sijoitetakaan kaikille potentiaalisille lomahdusalueille. Menetelmä on kehitetty aiemmin hieman erilaisen lastiluukutyypin lomahdustarkastelua varten ja se on todettu sillä toimivaksi.

Kuormitus- tapaus	Jännitys- suhde ψ reunalla	Sivu- suhde $\alpha=a/b$	Lommahduskerroin K	Vähennyskerroin κ
1 	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha \geq 1$	$K = \frac{8,4}{\psi + 1,1}$	$\kappa_x = 1$ for $\lambda \leq \lambda_c$ $\kappa_x = c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0,22}{\lambda^2} \right)$ for $\lambda > \lambda_c$ $c = (1,25 - 0,12\psi) \leq 1,25$ $\lambda_c = \frac{c}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{0,88}{c}} \right)$
	$0 > \psi > -1$		$K = 7,63 - \psi(6,26 - 10\psi)$	
	$\psi \leq -1$		$K = (1 - \psi)^2 \cdot 5,975$	
2 	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha \geq 1$	$K = F_1 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 \cdot \frac{2,1}{(\psi + 1,1)}$	$\kappa_y = c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{R + F^2(H - R)}{\lambda^2} \right)$ $c = (1,25 - 0,12\psi) \leq 1,25$ $R = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{c} \right)$ for $\lambda < \lambda_c$ $R = 0,22$ for $\lambda \geq \lambda_c$ $\lambda_c = \frac{c}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{0,88}{c}} \right)$ $F = \left(1 - \frac{\frac{K}{\lambda_p^2} - 1}{\lambda_p^2} \right) \cdot c_1 \geq 0$ $\lambda_p^2 = \lambda^2 - 0,5$ for $1 \leq \lambda_p^2 \leq 3$ $c_1 = \left(1 - \frac{F_1}{\alpha} \right) \geq 0$ $H = \lambda - \frac{2\lambda}{c \left(T + \sqrt{T^2 - 4} \right)} \geq R$ $T = \lambda + \frac{14}{15\lambda} + \frac{1}{3}$
	$0 > \psi > -1$	$1 \leq \alpha \leq 1,5$	$K = F_1 \left[\left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 \cdot \frac{2,1(1 + \psi)}{1,1} - \frac{\psi}{\alpha^2} (13,9 - 10\psi) \right]$	
		$\alpha > 1,5$	$K = F_1 \left[\left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 \cdot \frac{2,1(1 + \psi)}{1,1} - \frac{\psi}{\alpha^2} \cdot (5,87 + 1,87\alpha^2 + \frac{8,6}{\alpha^2} - 10\psi) \right]$	
	$\psi \leq -1$	$1 \leq \alpha \leq \frac{3(1 - \psi)}{4}$	$K = F_1 \left(\frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^2 \cdot 5,975$	
		$\alpha > \frac{3(1 - \psi)}{4}$	$K = F_1 \left[\left(\frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^2 \cdot 3,9675 + 0,5375 \left(\frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^4 + 1,87 \right]$	
3 	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha > 0$	$K = \frac{4 \left(0,425 + \frac{1}{\alpha^2} \right)}{3\psi + 1}$	$\kappa_x = 1$ for $\lambda \leq 0,7$ $\kappa_x = \frac{1}{\lambda^2 + 0,51}$ for $\lambda > 0,7$
	$0 > \psi \geq -1$		$K = 4 \left(0,425 + \frac{1}{\alpha^2} \right) (1 + \psi) - 5\psi(1 - 3,42\psi)$	
4 	$1 \geq \psi \geq -1$	$\alpha > 0$	$K = \left(0,425 + \frac{1}{\alpha^2} \right) \frac{3 - \psi}{2}$	
5 	$\psi =$		$K = K_\tau \cdot \sqrt{3}$	$\kappa_\tau = 1$ for $\lambda \leq 0,84$ $\kappa_\tau = \frac{0,84}{\lambda}$ for $\lambda > 0,84$
		$\alpha \geq 1$	$K_\tau = \left[5,34 + \frac{4}{\alpha^2} \right]$	
		$0 < \alpha < 1$	$K_\tau = \left[4 + \frac{5,34}{\alpha^2} \right]$	

Taulukko 5.1: Lommahdussäännön kertoimet

Tutkimuskohteena olevan luukun poluttamiseen tarvitaan useita kymmeniä polkuja, jos halutaan tarkastella koko luukkuu. Todellisuudessa ei ole kannattavaa laskea analyysiä kaikilla levykentillä, vaan tehokkaampaa on valita tutkittavat alueet ennakkotapausten avulla.

5.2 Luokituksen mukaisen ja lineaarisen lommaidustarkastelun vertailua

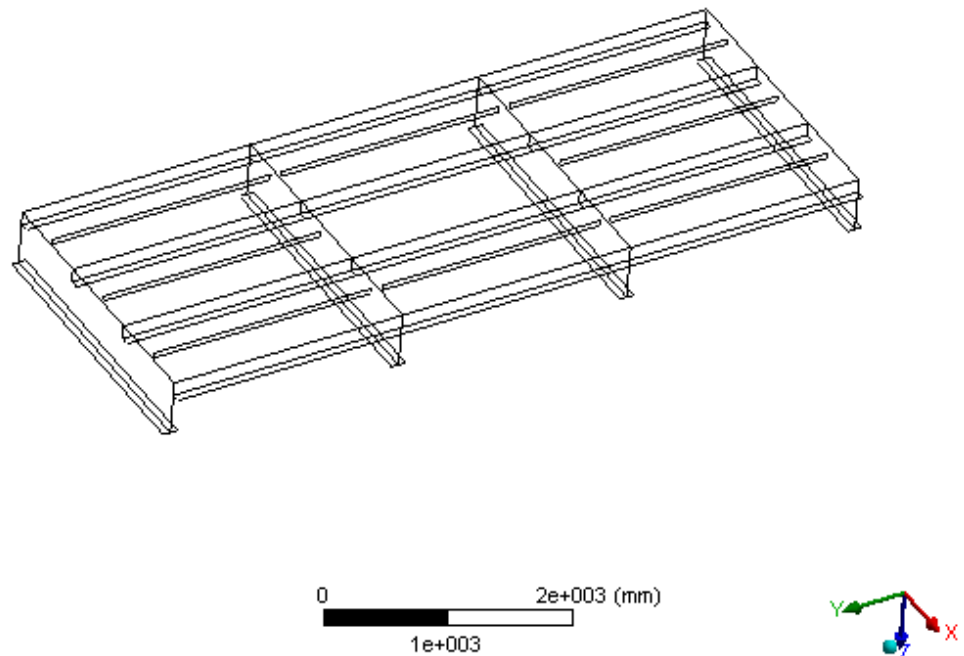
Käytännön laskenta suoritetaan tällä hetkellä luokituslaitoksen ohjeistuksen mukaisesti. ANSYS:n lineaarisen lommaidusanalyysin ja polkumenetelmän välisestä yhteydestä ei ollut varmuutta. Ennako-oletuksena eri menetelmien tulosten odotettiin olevan toisistaan poikkeavia. Yhteyttä lineaarisen ja luokituksen mukaisen menetelmän välillä haluttiin tutkia, sillä löydetty yhteys mahdollistaisi ANSYS:n tehokkaamman hyödyntämisen lommaiduksien laskennassa. Jos yhteys löytyy, voidaan lommaidusanalyysin automatisoitua optimointia yksinkertaistaa ja saavuttaa siten lyhyemmät laskenta-ajat.

Tulosten yhteneväisyyttä tutkittiin pienen esimerkin avulla. Esimerkkiä varten tehtiin lastiluukun kantta muistuttava yksinkertainen CAD-malli, joka näkyy kuvassa 5.2. Mallista pyrittiin tekemään riittävän realistinen, jotta se käyttäytyisi kuin oikea lastiluukku. Samalla mallin tuli olla riittävän yksinkertainen, jotta lommaidus ilmiönä näkyy siinä selkeästi.

Esimerkin tapauksessa kansi muodostuu yhdeksästä levykentästä, neljästä kantta tukevasta pitkittäispalkista (y -suunta) ja neljästä poikittaispalkista (x -suunta). Tutkimusta varten levykenttien poikki pituussuunnassa mallinnettiin lommaidustikut, joita on yhteensä kahdeksan. Keskimäinen levykenttä jätettiin ilman lommaidustikkua, sillä lommaiduksen haluttiin ilmentyvän keskimmaisella levykentällä. Levykentät ovat 820 mm leveitä, 2100 mm pitkiä ja 6 mm paksuja dimensioiltaan identtisiä alueita.

Malli on tuettu estämällä kansilevyn reunan z -suuntainen liike, toisen lyhyen sivun yläreunan y -suuntainen liike sekä toisen pitkän sivun yläreunan x -suuntainen liike. Lisäksi tuettujen sivujen välinen kulma on tuettu kiinteällä tuella.

Lommaiduksen aikaansaamiseksi mallia kuormitetaan neljällä kuormituksella. Ensimmäinen viivakuormitus on kohdistettu mallin x -suuntaista reunaa vasten kohtisuoraan ja vastaavasti toinen viivakuormitus y -suuntaista reunaa vasten kohtisuoraan. Näiden kahden voiman tarkoituksena on puristaa mallia. Kolmas kuormitustapa on viivakuormitus y -suuntaisella reunalla reunan suuntaisesti. Tätä voimaa kasvattamalla pyritään saamaan mallille enemmän leikkausjännitystä. Kuvatut kuormat on nimetty edellä esitetyssä järjestyksessä F1-F3. Lisäksi koko mallin kansilevyä on kuormitettu z -akselin suuntaisella painekuormalla. Vaihtelemalla kuormitusten



Kuva 5.2: Lommahdusanalyysien vertailuesimerkin CAD-malli yläviistosta kuvattuna

voimakkuuksia, pyritään saamaan mallille haluttuja jännitystiloja.

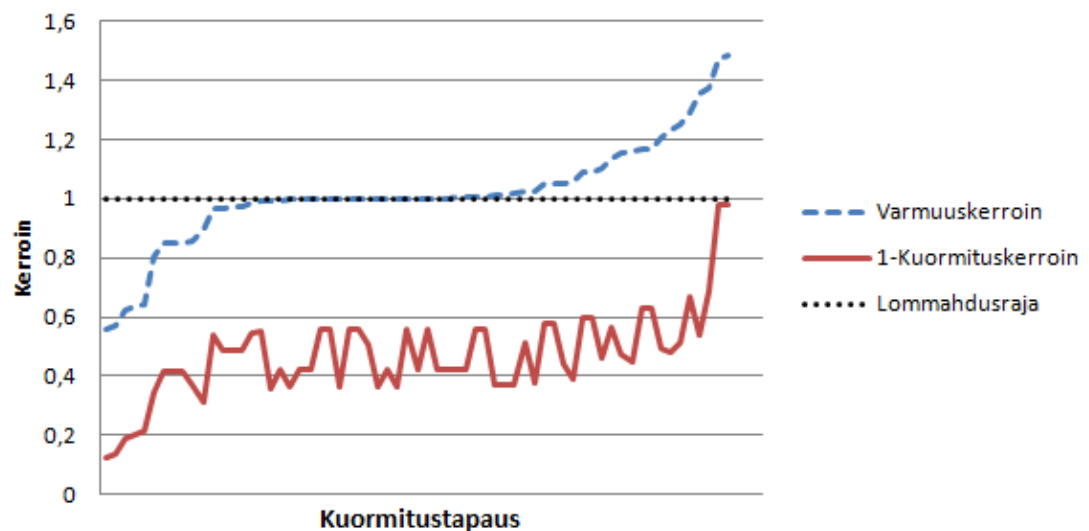
Kuvissa 5.3 ja 5.4 esitellään saatuja tuloksia. Lasketut koepisteet on esitetty taulukkomuodossa liitteessä A. Kuvassa 5.3 taulukon tulokset on esitetty varmuuskerroimen mukaan järjestettynä pienimmästä arvosta suurimpaan. Koepisteet on rajattu varmuuskertoimen mukaan välille 0,5-1,5. Kuvaan 5.4 on valittu taulukon arvoista jokasta kuormitusta kohden kymmenen koepistettä, joissa vain kyseistä kuormitusta on kasvatettu.

Luokituksen mukainen varmuuskerroin kuvaa tutkittavan alueen lommahduserkkyyttä. Jos varmuuskertoimen arvo on yli 1 alue lommahtaa. ANSYS:n laskema kuormituskerroin ennustaa millä kuormalla lommahdus tapahtuu. Koska kuormituskerroin ja varmuuskerroin eivät ole suoraan toisiinsa verrannollisia, on otettu kuvaajiin käyttöön kuormituskerrointa ja varmuuskerrointa kuvaavan muuttujan lisäksi kolmas muuttuja ”1-kuormituskerroin”. Apumuuttujan avulla tutkittavien menetelmien tuloksista saadaan helpommin vertailtavia.

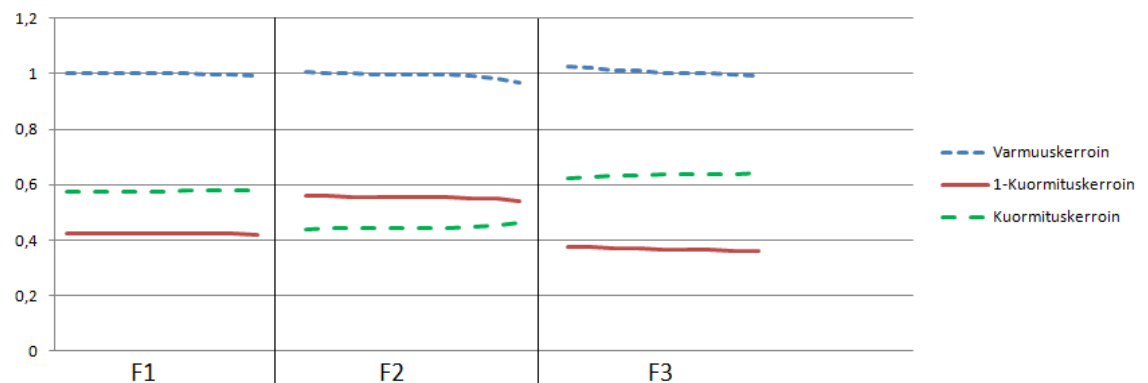
Ensimmäisessä kokeessa mallia kuormitettiin muuntamalla kuormituksen määrää. Tavoitteena oli varmuuskerroin mahdollisimman läheltä lommahdusrajaa. Rajan saavuttamiseksi pyrittiin käyttämään hyväksi erilaisia kuormitustilanteita. Tulosten

tarkastelua varten kuvassa 5.3 tulokset on asetettu luokituksen mukaisen menetelmän antaman kuormituskertoimen mukaiseen suuruusjärjestykseen pienimmästä suurimpaan. Kuvasta voidaan havaita, että apumuuttuja 1-kuormituskerroin seuraa varmuuskertoimen muodostamaa käyrää. Lommahdusraja on merkitty kuvaan pisteiviivalla. Kuvan perusteella tarkasteltu malli lommahtaa luokituksen mukaisella menetelmällä aiemmin, kuin lineaarisella mallilla. Tulosten perusteella näyttäisi lisäksi siltä, että varmuuskertoimen kasvaessa menetelmien yhdenmukaisuus heikenee.

Kuvassa 5.4 tulokset on jaoteltu kolmeen ryhmään kuormituksen mukaisesti. Jokaista kuorman suuruutta F1-F3 kasvatettiin erikseen, muiden pysyessä vakiona. Kuormitustapauksia laskettiin jokaista kuormaa kohden kymmenen kappaletta. Kuvasta voidaan havaita, että eri menetelmien antamat tulokset seuraavat toisiaan



Kuva 5.3: Kertoimien vertailu vaihtelevilla kuormituksilla. Tulokset on järjestetty varmuuskertoimen mukaan kasvavaan järjestykseen.



Kuva 5.4: Yhden kuorman kasvattamisen vaikutus kertoimien arvoihin

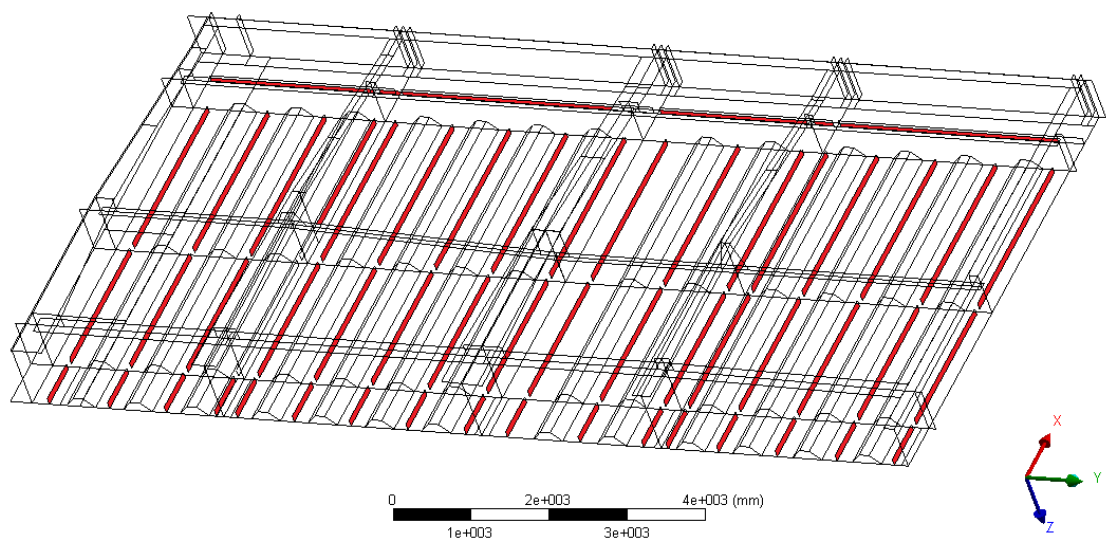
tietyn etäisyyden päässä, kun varmuuskerroin on lähellä raja-arvoa yksi. Jos tarkasteltaisiin vain voimien F1 ja F3 tapauksia, tulosten perusteella voitaisiin laskea suuntaa antava kerroin, jolla vertailtavat menetelmät seuraisivat melko tarkasti toisiaan. Tuloksissa tulee kuitenkin huomioida myös tapaus F2, jossa on kuormitettu mallin y-suuntaista reunaa. Tässä tapauksessa vertailtavien varmuuskertoimen ja apumuttujan 1-kuormituskerroin välillä ero pienenee, eri suhteessa kuin kahdessa muussa tapauksessa.

Esimerkin tuloksena ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä menetelmien kelpoisuudesta. Esimerkki kuitenkin osoittaa, että tietyillä edellytyksillä lineaarista lommahdusanalyysiä voitaisiin hyödyntää laskennassa.

5.3 Lommahdustikkujen automaattinen optimointi

Luokituksen mukainen menetelmä lommahdusten laskentaan on työläs laskea. Vaihtoehtona edellä esitetylle laskentatavalle haluttiin löytää uusi automaattista optimointia hyödyntävä menetelmä. Esitelty analysointitapa ei ole luokituslaitoksen hyväksymä. Menetelmässä koko kannen levykentät on käyty aluksi läpi ja lisätty niihin lommahdustikku. Automatisoinnin etuna muihin tässä esitettyihin menetelmiin on mahdollisuus laskea useita analyysejä yhtä aikaa. Laskija voi laittaa koneen laskemaan analyysejä, eikä hänen tarvitse olla koko ajan aktiivisesti itse mukana analyysin teossa.

Lommahdustikkujen poistomenetelmä on toteutettu mallintamalla lommahdustikut lastiluukun kannen pohjaan jo CAD-mallissa. Lastiluukun puolikas lommahdus-



Kuva 5.5: Lastiluukku lommahdustikuilla

tikuilla on esitetty kuvassa 5.5. Lommahdustikut on nimetty nimivalinnalla jokainen erikseen. Yhteensä tässä mallissa on 55 nimettyä lommahdustikkua. Nimetyt tikut on parametrisoitu ja niitä on käytetty optimoinnissa suunnittelumuuttujina. Suunnittelumuuttujat ovat määritelty binäärisiksi eli ne voivat saada arvoksi joko 0 tai 1.

Optimoinnissa kohdefunktiona on käytetty tikkujen lukumäärää. Käytännössä tikut saattavat olla rakenteessa eri arvoisia esimerkiksi aiheuttamansa painonlisäyksen tai sijaintinsa takia. Tässä yhteydessä on kuitenkin laskennan yksinkertaistamiseksi oletettu kaikki tikut yhden arvoiseksi. Tikkujen määrä on laskettu ANSYS:n esikäsittelyssä alla olevalla APDL-koodilla.

```
*do,i,1,8
*if, ARG%i%, eq, 1, then
SUMMA=SUMMA+1
*endif
*enddo
```

Koodilla tarkastetaan onko tikun arvo ARG%i% 0 vai 1. Jos tikun arvo on 1, lisätään koodissa SUMMA:n arvoa yhdellä. Lopuksi lasketaan ANSYS-ohjelman jälkikäsittelyssä tikkujen kokonaismäärä eli my_summa.

```
allsel,all
my_summa=SUMMA
```

Vasteena lommahdustikkujen poistomenetelmässä on käytetty kuormituskerrointa. Kuormituskertoimen arvo valitaan tapauskohtaisesti.

Optimointitehtävät muodostetaan merkitsemällä rajoitusyhtälöt optimointia varten pienemmäksi tai yhtäsuureksi kuin rajoite. Lineaarista lommahdusanalyysiä laskettaessa tavoitteena on rajoittaa kuormituskertoimelle minimiarvo, joten tehtävä ei ole suoraan analyysin vaatimassa muodossa. Tehtävä muotoillaan ratkaistavaan muotoon ottamalla kuormituskertoimesta käänteisluku ja parametrisoimalla sen rajoitteeksi, jolloin saadaan tavoitteen mukainen rajoitusehto.

5.4 Lommahdustikkujen lisääminen ilman optimointia

Yksi mahdollinen menetelmä tutkia lastiluukuun lommahdusta on laskea ANSYS-ohjelman lommahdusanalyysi ja jäykistää rakennetta analyysin tulosten perusteella tarpeen mukaan kierros kierrokselta. Lommahdustikkua lisätään yksitellen kohtaan, jossa lommahdus on todennäköisin. Kuten lommahdustikkujen optimointimenetelmässäkin, niiden lisäysmenetelmässä on kaikki lommahdustikut mallinnettu rakenteeseen valmiiksi. Menetelmän etuna on se, että rakenne on ennen tikkujen lisäämistä alkutilassa, jossa kaikkien lommahdustikkujen arvo on 0, eli ne eivät vaikuta rakenteen jäykkyyteen.

Menetelmän heikkoutena on sen hitaus, sillä jokaista tikkua varten tulee analyysi laskea uudelleen. Tämä tarkoittaa koko laivan luukkujen mittakaavassa jo usean tunnin työtä. Heikkoutena voidaan myös pitää sitä, että tikun paikan valitsee laskija silmämääräisen tarkastelun perusteella. Menetelmän mukaisen lommahdusanalyysin tekemiseen menee lommahdusanalyysin laskemiseen tarvittava aika sekä laskijan vaatima aika tikun sijoittamiseen analyysin mukaiselle paikalle.

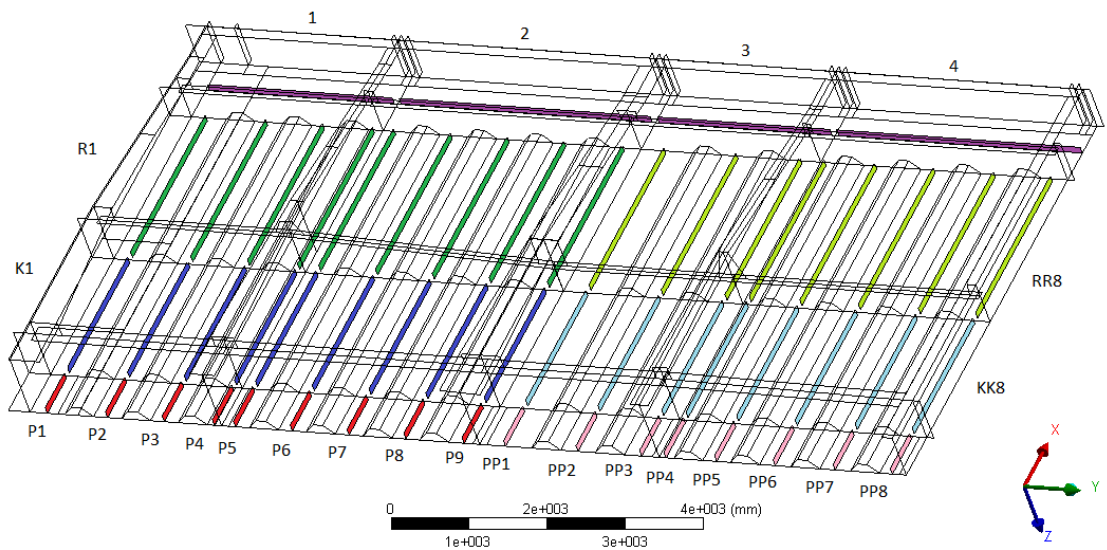
Lommahdustikkujen lisääminen voitaisiin toteuttaa myös niin, että jokainen tikku piirrettäisiin malliin erikseen, kunnes on saavutettu haluttu kuormituskerroin. Yksittäisten tikkujen piirtäminen yksi kerrallaan on kovin työlästä, joten on päädytty mallintamaan kaikki mahdollisesti tarvittavat lommahdustikut heti alussa.

6. LOMMAHDUSLASKENTAMENETELMIEN SOVELTAMINEN LASTILUUKUN SUUNNITTELUSSA

Tässä luvussa käydään läpi kolme esimerkkiä, joissa on käytetty edellisessä luvussa esiteltyjä menetelmiä. Kaikissa esimerkeissä on käytetty kuvan 5.5 mallia, joka on yksinkertaistettu malli todellisesta konttilaivan lastiluukusta. Esimerkkien avulla pyritään tutkimaan menetelmien toimivuutta, eikä laskea todellisen lastiluukun lujuusominaisuuksia. Lopussa vertaillaan eri menetelmillä saatuja tuloksia.

Reunaehdot lommahdusten laskennassa ovat samat kuin rakenteen optimointia käsittelevässä esimerkissä. Lastiluukun kanteen vaikuttaa kohtisuoraan ylhäältä tasainen 0.06 MPa painekuormitus. Kuormituskertoimen raja-arvo on 1. Jos kuormituskertoimen arvo jää alle yhden, tarkasteltava alue lommahtaa. Kuormituskertoimen ollessa yli yhden kertoo kerroin kuinka moninkertaisesti tarkasteltava alue kestää kuormituksen ennen lommahdusta. Varmuuskerroin on skaalattu niin, että sen suurin sallittu arvo on 1.

Esimerkeissä käytetty nimeämiskäytäntö on esitetty kuvassa 6.1. Lommahdustikut on nimetty kuvan mukaisesti vasemmalta oikealle kasvavassa järjestyksessä kuin symmetriatason reunan puolitetut lommahdustikut P1-P9. Puolivälissä nimen etukirjain kahdennetaan, jolloin oikean puoleisen osan nimet ovat vasemmalta oikealle PP1-PP8. Vastaavasti on nimetty keskimmäiset tikut käyttäen etukirjainta K ja reunimmaiset käyttäen etukirjainta R. Poikittain olevat tikut on nimetty oikealta vasemmalle numeroin 1-4. Lommahdustikkujen nimikointi vastaa myös kyseisten levykenttien nimikointia.



Kuva 6.1: Lommahdustikkujen nimeämiskäytäntö

6.1 Luokituksen mukainen menetelmä

Vertailutulosten saamiseksi ANSYS-ohjelman antamille tuloksille laskettiin luokituksen mukaisella analyysillä lastiluukun kriittisimmät lommahduskentät. Laskennassa hyödynnettiin valmista APDL-koodia. Tehtävässä jokaisen levykentän poikki pitkän sivun puolivälistä toiselle muodostettiin polku APDL-koodin avulla. Polulta laskettiin analyysiä varten tarvittavat levykentän normaalijännitykset sekä leikkausjännitys. Tulosten perusteella laskettiin varmuuskerroin lommahduksen suhteen.

Menetelmän mukaiset tulokset on esitelty taulukoissa 6.2 ja 6.3. Taulukkoon 6.2 on merkitty tummemmalla kolme kohtaa PP1, KK1 ja RR1, jotka käytetyllä kuormituksella vaativat tuekseen lommahdustikun. Tarkemmin lommahtavat alueet erottuvat kuvasta 6.2, johon lisättävät tikut on merkitty punaisella. Tulosten perusteella voitaisiin lisätä lommahdustikku vielä varmalla puolella, mutta hyvin lähellä rajaa olevalle kentälle KK3.

Lommahdustikkujen määrä pysyy melko maltillisena käytettäessä luokituksen

Taulukko 6.1: Vasteiden arvot optimirakenteelle

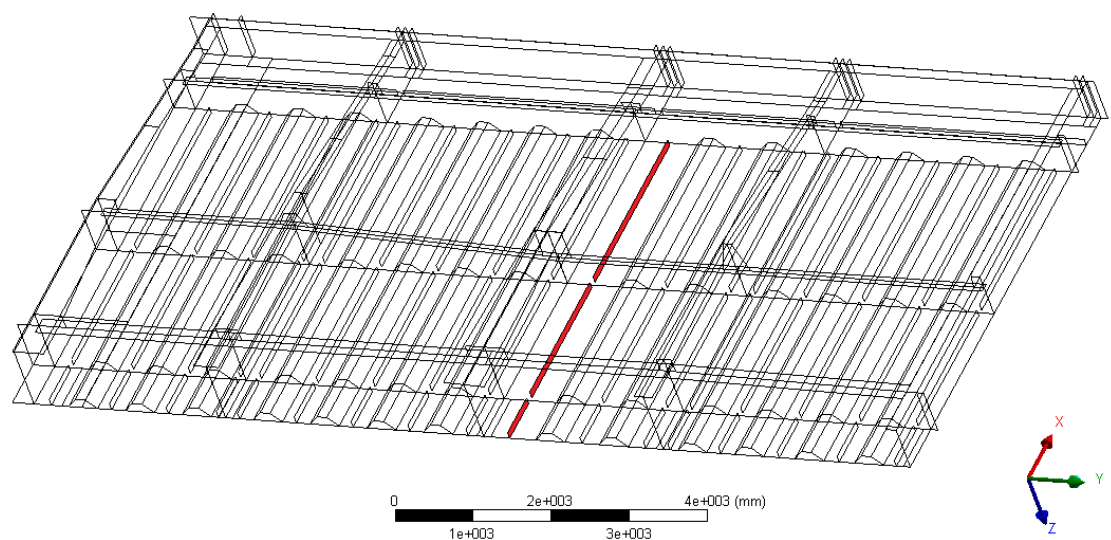
Vaste	Tarkka arvo	Mallin antama arvo	Virhe %
P25 massa	15386.98	15386.98	0,0
P26 deformaatio	9.97	9.98	0,1
P27 deformaatio	11.68	11.80	1.0

Taulukko 6.2: Suunnittelumuuttijien optimiarvot

Nimi	Varmuusluku	Nimi	Varmuusluku	Nimi	Varmuusluku
P1	0.0488	K1	0.0989	R1	0,26312
P2	0.21065	K2	0.24478	R2	0,13588
P3	0.26591	K3	0,28248	R3	0,20151
P4	0.10998	K4	0.0981	R4	0.0760
P5	0.35878	K5	0.29774	R5	0,31669
P6	0.3916	K6	0.4115	R6	0,40374
P7	0.44338	K7	0.5551	R7	0,43409
P8	0.48851	K8	0.61583	R8	0,5380
P9	0.61155	K9	0.68025	R9	0,77235
PP1	1.0366	KK1	1.2635	RR1	1,4672
PP2	0.71034	KK2	0.92936	RR2	0,75969
PP3	0.68278	KK3	0.98623	RR3	0,5897
PP4	0.17985	KK4	0.25905	RR4	0,36699
PP5	0.4724	KK5	0.79993	RR5	0,68141
PP6	0.4285	KK6	0.88876	RR6	0,70505
PP7	0.26566	KK7	0.62811	RR7	0,47492
PP8	0.44851	KK8	0.35628	RR8	0,19397

Taulukko 6.3: Suunnittelumuuttujien arvot alkutilassa

Nimi	Varmuusluku
Tikku1	0,21854
Tikku2	0,23712
Tikku3	0,61142
Tikku4	0,66662



Kuva 6.2: Luokituksen mukaisella lommahdusanalyysillä lasketun kannen lommahdustikut

mukaista menetelmää. Tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon, että kuormitus on vain sääkuormaa muistuttava, eikä lastiluukun todellinen kuormitus. Tulosta ei voida verrata suoraan todellisen lastiluukun tapaukseen, vaikka laskentamenetelmä on sama.

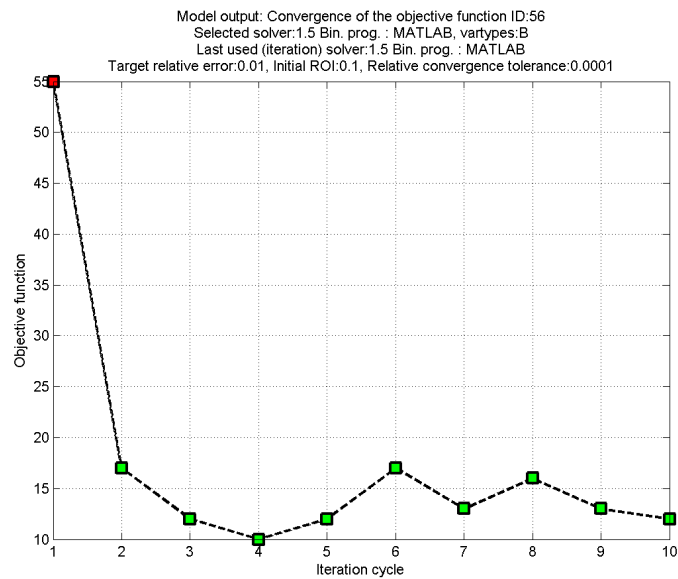
6.2 Lommahdustikkujen automaattinen optimointi

Lommahdustikkujen optimointia varten parametrisoitiin ANSYS-ohjelman argumenttien avulla kaikki 55 mallinnettua lommahdustikkua. Lommahdustikkujen realisoitumista kuvaavaavat parametrit toimivat tehtävän faktoreina, joita on siis tehtävässä yhteensä 55 kappaletta. Faktorien rajat ovat 0 ja 1. Jos faktori saa arvon 0 se ei realisoitu ja jos se saa arvon 1 se realisoituu. Lisäksi parametrisoitiin vastaavalla tavalla kohdefunktio sekä rajoitusehdot. Optimointitehtävässä minimoidaan lommahdustikkujen määrää siten että, että tikkujen aiheuttama massan lisäys tikkua kohden oletetaan samaksi. Rajoitusehtona käytetään kuormituskertoimen käänteislukua $1/\lambda_p$, jonka maksimiarvoksi asetetaan 1. Käänteisluvun avulla rajoitetaan kuormituskerroimelle minimiarvo, joka on sama kuin arvo, jonka alitettuaan tarkasteltu kohta lommahtaa.

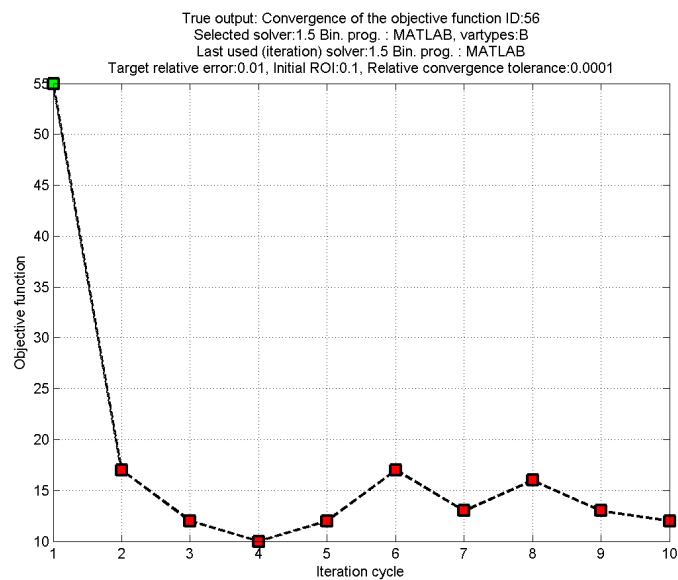
Optimointialgoritmina on tässä esimerkissä käytetty MATLAB:n lineaarista binäärioptimointia. Hyväksytty virhe on esimerkissä 1%. Aloituspisteessä kaikki tikut ovat olemassa, joten niiden arvo on 1. Kohdealueen arvo tehtävän alussa on 0,1. Kohdealueen muuttumista eri iteraatiokierroksilla on kuvattu kuvaajassa 6.5. Kuvasta nähdään kohdealueen arvon pieneneminen laskennan edetessä. Laskettavia koepisteitä tehtävässä on $N+1$, mku eli tässä tapauksessa 56 kappaletta. Iteraatiokierroksia tehtävässä lasketaan enintään 10 kappaletta. Jos ennen iteraatiokierrosten täyttymistä kohdefunktion arvo poikkeaa vähemmän kuin 0.01% edeltävän kierroksen kohdefunktion arvosta, optimointi lopetetaan.

Kun tehtävän lähtötiedot on annettu Simpro-ohjelmalle, lähettää se tehtävän eteenpäin MATLAB:n ja ANSYS-ohjelman laskettaviksi. Koepisteiden avulla muodostetaan tehtävästä metamalli, jolla pyritään löytämään optimointitehtävän kohdefunktion minimikohta. Kuten rakenteen optimoinnissa, tässäkin ANSYS laskee ensin tehtävän sille annetuissa koepisteissä ja palauttaa vasteiden arvot laskentaohjelmalle. Tulosten perusteella muodostetaan vastepinta. MATLAB laskee tämän jälkeen tehtävälle ratkaisun. Ensimmäisen iteraatiokierroksen jälkeen lommahdustikkujen määrä on tippunut 55:sta 17, kuvat 6.3 ja 6.4. Vasteen arvo tehtävän alkutilanteessa oli 0,8767. Ensimmäisen iteraatiokierroksen jälkeen metamalli antaa vasteen arvoksi 0,98171. Lujuuslaskentamallilla laskettuna vasteen arvo on ensimmäisen kierroksen jälkeen 1,1765. Vasteiden arvoista nähdään, ettei metamallista laskettu ratkaisu vastaa suoraan todellisen mallin antamaa vastetta.

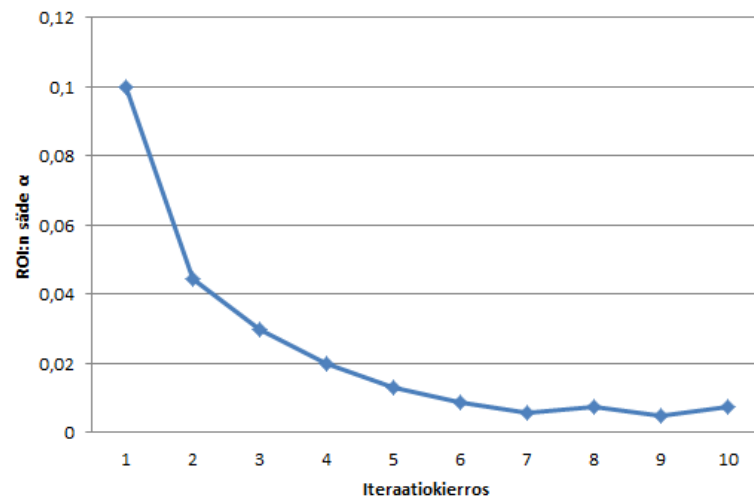
Ensimmäisen iteraatiokierroksen perusteella lasketaan uudet koepisteet seuraa-



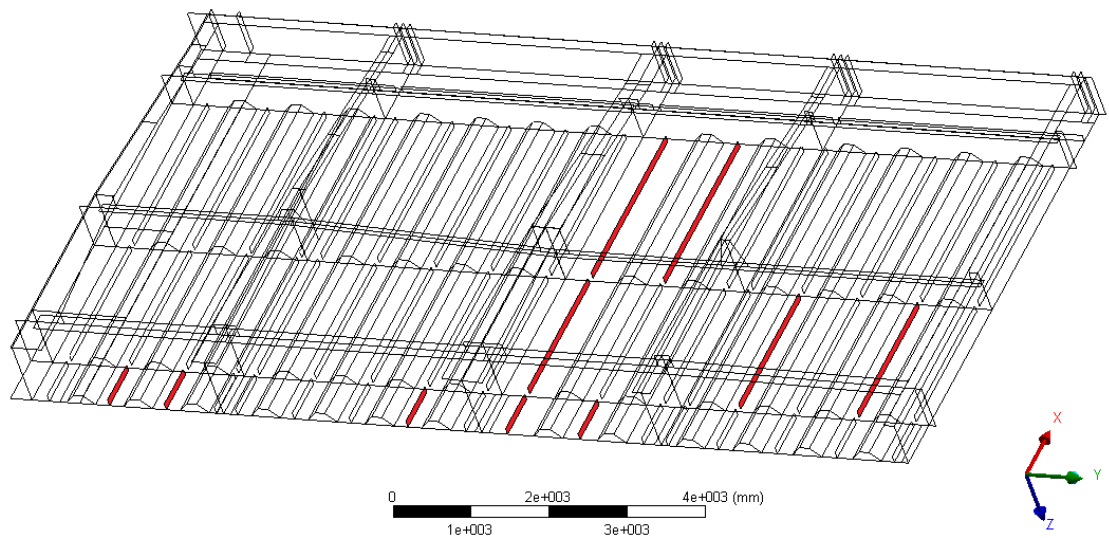
Kuva 6.3: Kohdefunktion suppeneminen metamallilla



Kuva 6.4: Kohdefunktion suppeneminen lujuuslaskentamallilla



Kuva 6.5: Kohdefunktion säteen muuttuminen iteraatiokierroksilla



Kuva 6.6: Automaattisen optimoinnin tuottamat lommahdustikut

vaa optimointikierrosta varten. Tutkittavaa alue kutistuu, kun ROI:n arvo pienenee 0,044449. Tästä optimointi jatkuu kuten ensimmäisellä kierroksella. Toisen kierroksen jälkeen lommahdustikkujen määrä on edelleen vähentynyt edeltävän kierroksen 17 lommahdustikusta 12 lommahdustikkuun. Metamallin mukainen vaste on 0,97655, kun vastaava arvo lujuuslaskentamallilla on 1,2159. Tehtävä ei toisenkaan kierroksen jälkeen täytä optimoinnin lopetuskriteerejä, joten optimointia jatketaan. Lopullinen lopetuskriteeri on maksimi iteraatiokierrosten saavuttaminen.

Optimoinnin tuloksena ei saavuteta selkeää optimipistettä, jossa sekä metamallin antama että lujuuslaskentamallin antama tulos olisivat käypä. Esimerkin tapauksessa parhaaksi tulokseksi on valittu kierroksen neljä tulos, sillä siinä lommahdustikkujen määrä on minimissään. Optimipisteessä lastiluukun lommahdusta estetään kymmenellä lommahdustikulla P2, P3, P8, PP1, PP2, KK1, KK5, KK7, RR1 ja RR3. Lommahdustikkujen paikat on esitetty kuvassa 6.6.

6.3 Lommahdustikkujen lisäysmenetelmä

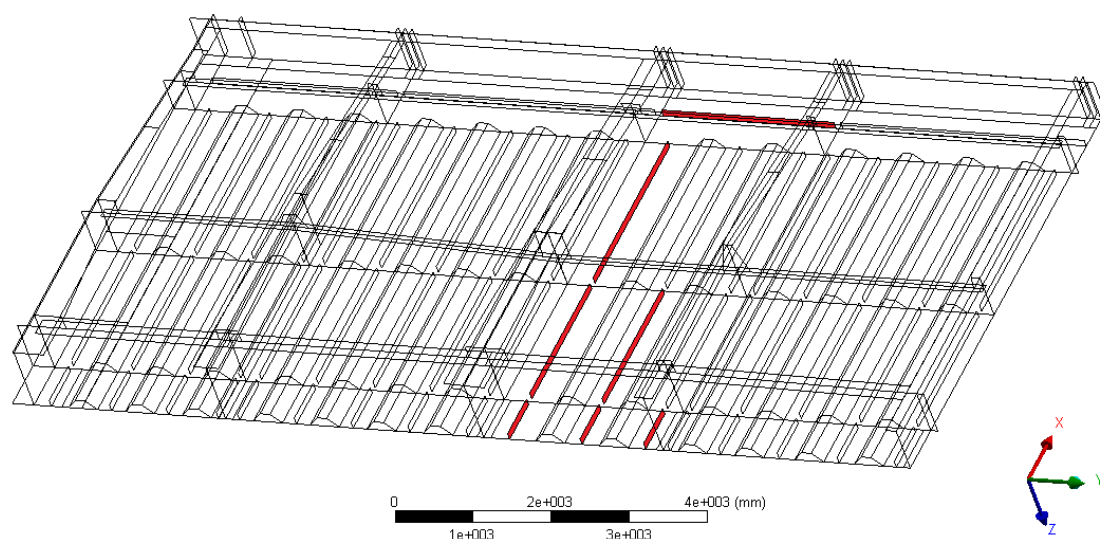
Kun lastiluukun lommahdusta tutkittiin lisäämällä lommahdustikkuja vasta tarpeen mukaan aloittaen tikuttomasta kannesta, saatiin kuvan 6.7 mukainen tulos. Taulukossa 6.4 on esitetty tikkujen lisäysjärjestys, sekä niitä vastaavat kuormituskertoimet. Laskenta on tehty ANSYS-ohjelman lineaarisella lommahdusanalyysillä.

Kuormituskertoimen minimiarvoksi tässä esimerkissä on määritetty 1. Aluksi, kun kansi oli vapaa lommahdustikuista, sen kuormituskerroin oli 0,61506. Vertailtavana kuormituskertoimenä käytettiin lineaarisen lommahdusanalyysin ensimmäisen lommahdusmuodon kuormituskerrointa. Lineaarisesta lommahdusanalyysistä saadun kuvan 6.8 perusteella lommahduksen kannalta kriittisin levykenttä on tikkua PP1 vastaava alue.

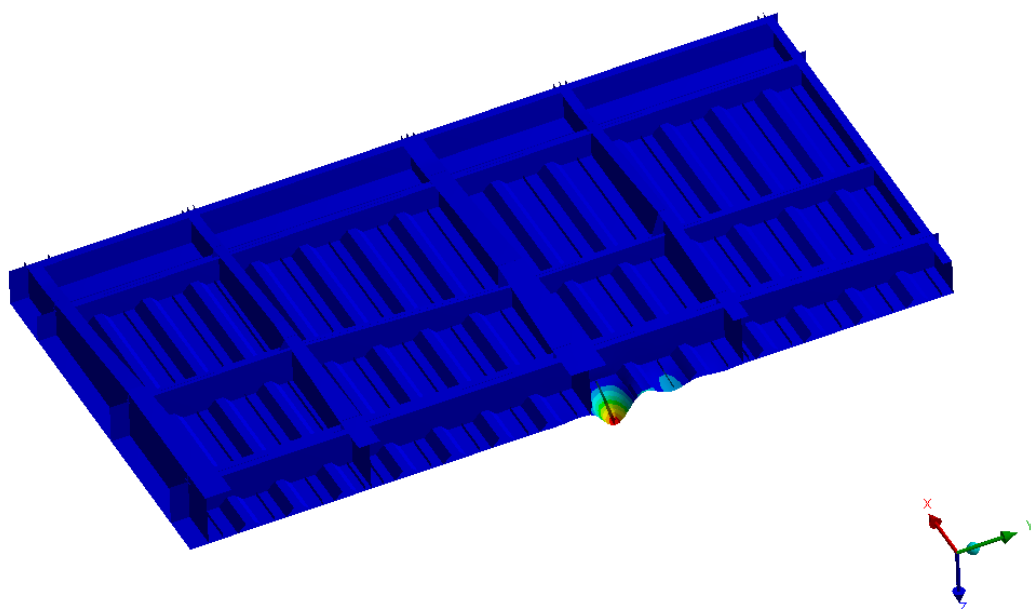
Ensimmäisen lommahdustikun lisäyksen jälkeen analyysi lasketaan uudelleen, jotta nähdään miten ensimmäinen tikku on vaikuttanut lastiluukun lommahduserkkyyteen. Taulukon arvoista huomataan, että toisen kierroksen kuormituskerroin on

Taulukko 6.4: Lommahdustikkujen lisääminen kierroksittain

Kierros	Kuormituskerroin	Nimi
0	0.61506	
1	0.63492	PP1
2	0.64174	KK1
3	0.80584	RR1
4	0.80541	3
5	0.92629	PP2
6	0.98738	KK2
7	1.0274	PP3



Kuva 6.7: Lastiluukun lommahdustikut tikkujen lisäysmenetelmällä



Kuva 6.8: Lastiluukun ensimmäinen lommahdusmuoto ilman lommahdustikkuja

noussut arvoon 0,63492. Laskennan tuloksena saadaan uusi kuva, josta nähdään uusi lommahdukselle herkkä alue. Laskentaa ja tikkujen lisäämistä toistetaan, kunnes on saatu riittävä varmuus lommahduksen suhteen.

Lopullisten lommahdustikkujen paikat on merkitty kuvaan 6.7. Menetelmän mukaisesti kansi on jäykistetty seitsemällä lommahdustikulla lommahdusta vastaan. Tikkujen lisääminen on lopetettu, kun kuormituskertoimen arvo on ensimmäisen kerran ylittänyt arvon 1.

6.4 Menetelmien tulosten vertailu

Edellä esitetty menetelmää antavat kaikki erilaisen lopputuloksen lommahdusanalyysille. Ennakko-odotuksena lineaariseen lommahdusanalyysiin perustuvien menetelmien tulisi antaa melko samanlaiset tulokset. Lasketut esimerkit kuitenkin osoittavat oletuksen vääräksi. Yhteistä molemmille menetelmille oli kuitenkin lommahdustikkujen painottuminen lastiluukun keskellä oleviin lommahdustikkuihin. Kolme lommahdustikkua PP1, KK1 ja RR1 realisoituivat kaikilla kolmella menetelmällä laskettaessa.

Lineaariseen lommahdusanalyysiin perustuvien menetelmien heikkous on analyysin kohteen rajaamiseen liittyvät ongelmat. Analyysi joudutaan laskemaan kokonaisella lastiluukulla, vaikka oltaisiin kiinnostuneita vain tietyn osan, kuten kannen lommahdusmuodoista. Koko lastiluukun analysoiminen vääristää tuloksia verrattuna tietyn osan analyysiin. Polkuja hyödyntävässä menetelmässä ongelmaa ei ole ja analyysi voidaan kohdentaa lommahduksen osalta kiinnostaville alueille.

Työajan tehostamisen kannalta lommahdustikkujen optimointiin perustuva menetelmä on paras. Se on ainoa menetelmä, jossa useita analyysejä voidaan laskea yhtä aikaa. Verrattaessa menetelmän antamia tuloksia luokituksen mukaiseen laskentaan havaitaan kuitenkin tulosten olevan kaukana toisistaan. Luokituksen mukainen menetelmä lisäisi tikun kolmeen ja optimointi kymmeneen kohtaan. Näiden esimerkkien pohjalta lineaarinen analyysi antaa varmemman lopputuloksen, kuin luokituksen mukainen analyysi. Kolmeen esimerkkiin pohjautuvia tuloksia ei kuitenkaan voida pitää luotettavina, niin että voitaisiin sanoa lineaarisen menetelmän aina tuottavan jäykemmän rakenteen.

Lommahdustikkujen lisääminen yksitellen on hitain ja työläin menetelmä, eikä sen voi sanoa tuottavan riittävän varmaa tulosta, jotta sitä kannattaisi käyttää todellisen lastiluukun laskennassa. Jatkotutkimusta vaatii, miten polkuja hyödyntävän ja automaattisen optimoinnin parhaat puolet voitaisiin yhdistää tehokkaaksi ja luokituksen mukaiseksi analyysiksi. Vaihtoehtona on esimerkiksi varmuusluvun parametrisoiminen ja sen arvon tutkiminen optimoinnin avulla.

7. YHTEENVETO

Konttilaivan lastiluukun suunnitteluprosessin selvitystyö sisälsi useita erilaisia vaiheita, jotka osittain olivat itsenäisiä ja osittain riippuivat toisistaan. Tämän esitutkimuksen yhteydessä on käytetty SolidWorks-, ANSYS- ja Simpro-ohjelmia. Simpro oli optimoinnin alkaessa vasta osittain kokeiluvaiheessa. Työn edetessä myös Simproa on kehitetty vastaamaan työssä esiin tulleita tarpeita. Kaikki edellä esitetyt menetelmät voidaan mainittujen ohjelmien lisäksi suorittaa myös muilla samantyyppisillä ohjelmilla, jotka sisältävät tarpeelliset ominaisuudet.

Työn aluksi oli luukusta saatavilla CAD-malli, joka ei sellaisenaan soveltunut lujuuslaskentaan. Mallista tehtiin uusi oma yksinkertaistettu lujuuslaskentamalli, jota laskennan edetessä muokattiin tehtävissä ilmenneiden tarpeiden mukaisesti. Mallin valmistuttua laskettiin useita erilaisia analyysyjä, joiden pohjalta suunniteltiin työssä esiteltyt esimerkkitaupaukset. Rakenteen optimoinnin esimerkkiä varten laskettiin kaksi erilaista kuormitustapausta ja optimoitiin niiden perusteella kannen, uumien ja laippojen paksuudet. Lomahdustarkastelujen osalta tutkimus rajoitettiin koskemaan vain lastiluukun kantta yhdellä kuormitustapauksella. Lomahdusta koskevissa esimerkeissä tutkittiin ANSYS:n ja luokituksen mukaisen lomahdusanalyysin eroja ja yhtäläisyyksiä.

Työn päätavoitteena oli tutkia automaattisen optimoinnin soveltuvuutta lastiluukun laskentaan. Työssä on tutkittu menetelmiä, jotka olisivat helposti automatisoitavia vaihtoehtoja nykyisille laskijan kokemukseen perustuville laskentatavoille. Automatisoinnilla voidaan saavuttaa paremmat ratkaisut nopeammassa ajassa, kuin perinteisillä menetelmillä laskettaessa. Yrityksissä laskentaan kulutettu aika kuluttaa myös yrityksen rahallisia resursseja, joten laskenta kannattaa suunnitella niin, että aikaa laskemiseen kuluu mahdollisimman vähän. Esimerkiksi tarjouslaskentaa tehtäessä riittävällä tarkkuudella olevia tuloksia on saatava nopeasti.

Yhdessä konttilaivassa on useita erikokoisia ja vaatimuksiltaan erilaisia lastiluukuja, jolloin yhden luukun laskentaan ei voida käyttää turhaa laskenta-aikaa. Silloin hyvin suunnitellulla perusmallilla, jota on helppo muunnella tarpeiden mukaisesti, voidaan säästää aikaa.

Laskenta-aikaa pohtiessa tulee miettiä automatisoidun ohjelman etuja verrattuna manuaaliseen laskijalähtöiseen menetelmään. Automatisoinnilla voidaan laskentaajaksi hyödyntää laskijan työpäivän lisäksi keskeytymättä koko vuorokausi. Lisäksi

eri luukkujen laskentaa voidaan tehdä yhtäaikaaisesti käyttämällä useaa eri tietokonetta. Laskentaa voidaan nopeuttaa esimerkiksi käyttämällä pilvilaskennan väliohjelmisto Techilaa. Techilan avulla laskut voidaan lähettää usean tietokoneen laskettavaksi. Kun tehtävät on laskettu, Techila palauttaa tulokset takaisin käyttäjän tietokoneelle. Käytännössä optimoinnin alkuvalmistelut tehdään Simpron avulla paikallisesti, jonka jälkeen Techila lähettää MATLAB:n laskeman suunnittelumatriisin mukaiset optimointitehtävät käytössä olevien laskentakoneiden ANSYS-ohjelmille. Tulosten palaututtua lasketaan vielä paikallisesti todellisen mallin ratkaisu.

Konttilaivan lastiluukun optimoinnissa käytetään optimointitehtävästä riippuen useaa kymmentä, ellei jopa yli sataa suunnittelijamuuttujaa. Muuttujien määrä kertaantuu aina, kun laskentaan huomioidaan uusi kuormitustapaus. Esimerkiksi laskettaessa kannen paksuuden optimointia sääkuormalla on työssä esitellyn esimerkin mukaisesti kolme suunnittelumuuttujaa P1-P3. Jos laskennassa halutaan huomioida myös muita kuormia tulee suunnittelumuuttujien määrä kertoa kuormitustapausten lukumäärällä, jolloin esimerkkitapauksessa laskettaessa kahta kuormitustapausta suunnittelumuuttujia olisi yhteensä kuusi. Varsinaisessa optimointitehtävässä suunnittelumuuttujien määrä pysyy kuitenkin samana, kuin yhden kuormitustapausten laskennassa, sillä toisiaan vastaavat suunnittelumuuttujat merkitään yhtä suuriksi, jolloin laskenta voidaan suorittaa käyttäen vain toista parametria. Merkitsemällä toisiaan vastaavien parametrien arvot yhtäsuuriksi, saadaan optimoinnin ratkaisuna tulos, joka ottaa huomioon kaikki lasketut kuormitustapaukset.

Työssä esitetyn esimerkin perusteella rakenteen automaattinen optimointi toimii. Esimerkissä on käsitelty ainoastaan kaksi erilaista kuormitustapausta, mutta niiden perusteella voidaan olettaa, että myös useampien kuormitustapausten laskeminen onnistuu. Uusien tapausten lisääminen vaatii käyttäjältä hieman lisätyötä tehtävän muodostamisessa, mutta varsinaiseen laskentaan se ei merkittävästi vaikuta. Rakenteen optimoinnista kannattaa tehdä lisää tutkimuksia, jotta sitä voidaan hyödyntää todellisen lastiluukun laskentaan.

Lommahdusta koskevien esimerkkien perusteella ei voida suoraan päätellä, että testattuja uusia menetelmiä voitaisiin hyödyntää todellisen lastiluukun tapauksessa. Esimerkkien perusteella luokituksen mukaisella laskennalla ja lineaarisella lommahdusanalyysillä on yhteisiä tekijöitä, mutta niiden perusteella ei lineaarisen lommahdusanalyysin käyttäminen ilman lisätutkimuksia ole perusteltua.

Myös muita laskentamenetelmiä kannattaa tutkia jatkossa. Tämän työn perusteella seuraavaksi lommahdusta koskevan tutkimuksen kohteeksi voitaisiin ottaa luokituksen mukaisen levykentille sijoitettaviin polkuihin perustuvan menetelmän kehittäminen. Mahdollisuutena olisi esimerkiksi löytää menetelmä, jossa hyödynnetään tässä työssä esiteltyjen menetelmien hyviä puolia. Jos uusi menetelmä lommahdukseen laskentaan löytyy, tulee se testata tässä työssä käytetyn kannen lisäksi myös

uumien laskennassa.

Lisäksi olisi hyvä tutkia laskentaprosessien yhdistämistä yhden tehtävän alle. Tässä työssä rakenteen optimointi ja lommahdusanalyysit on eriytetty, vaikka käytännön laskennassa ne kulkisivat yhdessä ja vaikuttaisivat toisiinsa.

Työssä esiteltyjä menetelmiä pyritään soveltamaan teollisuuden tuotesuunnitteluun. Lastiluukkuja on jo vuosikymmeniä laskettu ilman automaattista optimointia niin sanotun käsinlaskennan ja empiirisen kokemuksen pohjalta. Laskennan menetelmät ovat hioutuneet jo melko nopeiksi ja optimointiin verrattuna melko tarkoiksi. Haittana on kuitenkin tulosten riippuvuus laskijan kokemuksesta ja taidoista. Nykyisin käytettävällä menetelmällä eri laskijat saattavat päätyä eri lopputulokseen laskiessaan samaa tapausta. Uusien menetelmien tavoitteena onkin yhdenmukaistaa laskentaa, jolloin tulosten vertailu on helpompaa. Jotta uudet menetelmät saadaan käyttöön, tulee niiden olla toimivia ja riittävän helposti omaksuttavia.

Vaikka lastiluukun lujuuden laskenta tarjous- ja suunnitteluvaihetta varten saataisiin optimoitua automaattisesti, tarvitaan edelleen myös käyttäjän työpanosta. Käyttäjän tehtävänä on muodostaa optimointiongelma, josta on mahdollista saada käyttökelpoisia tuloksia. Lisäksi käyttäjän tehtävä on tulkita ja tehdä päätöksiä saatujen tulosten perusteella. Laskenta-aikaa voidaan esimerkiksi pienentää rajaamalla jo optimointitehtävää muodostettaessa laskennasta pois tulosten kannalta epäoleellisia asioita.

Työssä esitelty lastiluukun laskentaan liittyvät automaattisen optimoinnin menetelmät ovat sovellettavissa myös muihin vastaaviin rakenteisiin. Käyttämällä hyvin suunniteltua parametrissa CAD-mallia voidaan optimoitu rakenne saavuttaa pienillä käyttäjän lisäämillä tiedoilla. Optimointi perustuu lineaariseen vastepintamenetelmään ja yksinkertaisiin optimointialgoritmeihin, joita on käytetty iteratiivisesti, jotta on saavutettu vähintään lokaali minimikohta. Automaattisella optimoinnilla saavutetaan optimitulos perinteistä suunnitteluprosessia nopeammin ja lopputuloksena hieman kevyempi rakenne, kuin perinteisillä menetelmillä.

LÄHTEET

- [1] Räisänen, P. 1997. Laivatekniikka: Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Helsinki, Opetushallitus. 752 s.
- [2] Cargotec. <http://www.cargotec.com/en-global/macgregor/products/Hatch-covers/Pages/default.aspx>. Viitattu 16.10.2013
- [3] IACS. 2011. Requirements concerning strength of ships s21a. Voimassa 1.5.2011 alkaen.
- [4] Pajunen, S., ja Heinonen O. 2013. Automatic design of marine structures by using successive response surface method. Hyväksytty julkaistavaksi lehdessä Structural and Multidisciplinary Optimization.
- [5] MathWorks. MATLAB Help R2012b. Sähköisessä muodossa olevat manuaalit.
- [6] Haataja, J. 2004. Optimointitehtävien ratkaiseminen. CSC.
- [7] Nash, S. 1996. Linear and Nonlinear Programming. New York, McGraw-Hill. 692 s.
- [8] ANSYS Workbench R14.5 User's Guide. Sähköisessä muodossa olevat manuaalit.
- [9] Heinonen, O. 2011. Vastinpintamenetelmän soveltaminen lujuuslaskennassa. Opinnäytetyö, Tampereen teknillinen yliopisto. 61 s.
- [10] Mellin, I. 2010. Koesuunnittelu prosessin suunnittelun ja parantamisen työvälineenä: Vastepintamenetelmä.
- [11] Khuri, A. 1996. Response Surfaces: Design and Analyses. New York, Dekker. 510 s.

A. LIITTEITÄ

Taulukko A.1: Luokituksenmukaisen ja lineaarisen lommahdustarkastelun vertailun laskennalliset tulokset

P[MPa]	F1[kN]	F2[kN]	F3[kN]	τ	σ_x	σ_y	S	λ_p
0,01	20	50000	1	-11,06	1281,47	79,93	1,4868	0,0181
0,01	1	50000	1	-11,07	1281,46	78,95	1,4704	0,0181
0,1	1	2000	5	-1,10	75,59	40,53	1,3719	0,3090
0,1	2000	15	5	-0,25	25,86	140,31	1,3528	0,4585
0,1	1	1800	5	-1,05	70,47	40,23	1,2908	0,3310
0,1	1800	15	5	-0,29	25,75	130,02	1,2527	0,4894
0,1	1	1	2000	-27,35	29,32	87,98	1,2287	0,5187
0,1	1700	15	5	-0,31	25,70	124,88	1,2027	0,5058
0,1	1	1500	5	-0,99	62,80	39,78	1,1692	0,3702
0,1	1	1500	5	-0,99	62,80	39,78	1,1692	0,3702
0,1	1	1	1800	-24,68	28,83	82,92	1,1611	0,5534
0,1	1600	15	5	-0,33	25,65	119,74	1,1527	0,5226
0,2	10	5	5	-1,24	48,98	75,34	1,1361	0,4368
0,1	1500	15	5	-0,36	25,60	114,60	1,1028	0,5400
0,1	1	1300	5	-0,94	57,68	39,48	1,0882	0,4019
0,1	1	1300	5	-0,94	57,68	39,48	1,0882	0,4019
0,1	1	1	1500	-20,66	28,10	75,34	1,0599	0,6065
0,1	1400	15	5	-0,38	25,54	109,46	1,0529	0,5578
0,1	1	1200	5	-0,92	55,13	39,33	1,0477	0,4198
0,1	1	1200	5	-0,92	55,13	39,33	1,0477	0,4198
0,1	1	1	1400	-19,32	27,85	72,81	1,0263	0,6235
0,18	10	5	5	-1,13	44,09	67,87	1,0219	0,4851
0,1	1	1	1380	-19,06	27,80	72,30	1,0195	0,6268
0,1	1	1	1350	-18,66	27,73	71,54	1,0095	0,6318
0,1	1	1	1350	-18,66	27,73	71,54	1,0095	0,6318
0,1	1	1100	5	-0,90	52,57	39,18	1,0072	0,4393
0,1	1	1100	5	-0,90	52,57	39,18	1,0072	0,4393
0,1	1300	15	5	-0,40	25,49	104,32	1,0030	0,5759
0,1	1298	15	5	-0,40	25,49	104,22	1,0020	0,5762
0,1	1297	15	5	-0,40	25,49	104,17	1,0015	0,5764

Taulukko A.2: Luokituksenmukaisen ja lineaarisen lommahdustarkastelun vertailun laskennalliset tulokset

P[MPa]	F1[kN]	F2[kN]	F3[kN]	τ	σ_x	σ_y	S	λ_p
0,1	1297	15	5	-0,40	25,49	104,17	1,0015	0,5764
0,1	1	1085	5	-0,89	52,18	39,15	1,0012	0,4424
0,1	1296	15	5	-0,40	25,49	104,12	1,0010	0,5766
0,1	1	1083	5	-0,89	52,13	39,15	1,0004	0,4428
0,1	1	1	1322	-18,28	27,66	70,83	1,0001	0,6364
0,1	1294	15	5	-0,40	25,49	104,01	1,0000	0,5770
0,1	1	1	1322	-18,27	27,66	70,82	0,9999	0,6365
0,17	20	15	5	-1,10	43,12	66,51	0,9998	0,4956
0,1	1	1081	5	-0,89	52,09	39,15	0,9997	0,4431
0,1	1	1081	5	-0,89	52,08	39,15	0,9995	0,4432
0,1	1	1	1320	-18,2	27,66	70,78	0,9994	0,6367
0,1	1	10815	5	-0,89	52,07	39,15	0,9993	0,4433
0,1	1	1080	5	-0,89	52,06	39,15	0,9991	0,4434
0,1	1290	15	5	-0,40	25,49	103,81	0,9980	0,5777
0,1	1290	15	5	-0,40	25,49	103,80	0,9980	0,5777
0,1	1	1	1310	-18,12	27,63	70,53	0,9960	0,6384
0,1	1280	15	5	-0,40	25,48	103,29	0,9931	0,5795
0,1	1	1	1300	-17,99	27,61	70,28	0,9927	0,6400
0,1	1	1060	5	-0,89	51,54	39,12	0,9910	0,4476
0,1	1	1040	5	-0,88	51,03	39,09	0,9829	0,4519
0,17	20	15	5	-1,07	41,91	64,66	0,9716	0,5099
0,17	15	15	5	-1,07	41,91	64,41	0,9702	0,5104
0,17	10	10	5	-1,07	41,78	64,14	0,9669	0,5122
0,1	1	1000	5	-0,88	50,01	39,03	0,9668	0,4606
0,1	1	1	1000	-13,97	26,88	62,69	0,8921	0,6890
0,1	1000	15	5	-0,46	25,33	88,90	0,8537	0,6323
0,15	10	5	5	-0,95	36,77	56,67	0,8510	0,5815
0,15	10	5	1	-0,90	36,76	56,56	0,8497	0,5819
0,15	10	1	1	-0,89	36,66	56,56	0,8480	0,5833
0,1	900	15	5	-0,48	25,28	83,76	0,8064	0,6519
0,1	290	15	5	-0,60	24,96	52,40	0,6440	0,7873
0,1	250	15	5	-0,61	24,94	50,35	0,6335	0,7974
0,1	200	15	5	-0,62	24,92	47,78	0,6204	0,8103
0,1	20	15	5	-0,65	24,82	38,52	0,5735	0,8594
0,1	1	1	1	-0,60	24,44	37,42	0,5616	0,8763